ECOLE D'ENSEIGNEMENT TECHNIQUE
DE L'ARMEE DE TERRE

42·0100

COURS ELEMENTAIRE d'ELECTRONIQUE

TOME 1

SOMMAIRE

Chapitre - 1 - GENERALITES SUR L'ELECTRONIQUE

10 - Définition
11 - Initiation à la physique nucléaire
111 - Classification périodique des éléments
12 - Interprétation électronique des phénomènes électriques
121 - Propriétés générales des électrons

Chapitre - 2 - ETUDE STATIQUE DES TUBES A VIDE

20 - Généralités sur les tubes à vide
201 - Rôle de la tension anodique
202 - Commande d'un courant électronique
21 - Le tube diode
22 - Le tube triode
221 - Caractéristiques
222 - Paramètres fondamentaux
223 - Réseau idéalisé
224 - Différents types de triode
225 - Limitation des triodes
23 - Le tube tétrode
231 - Tétrode à faisceaux dirigés
24 - Le tube pentode
241 - Pentode à pente variable
242 - Comparaison avec la triode
243 - Différents types de pentode
25 - Les tubes à rayons cathodiques
251 - Oscillographe cathodique
26 - Les tubes à gaz
261 - Ionisation des gaz
262 - Différents types de décharges
263 - Les phanotrons
264 - Les thyratrons
265 - Fonctionnement des thyratrons en alternatif
27 - Tableau des tubes faibles et petite puissance

Chapitre - 3 - SEMI - CONDUCTEURS

31 - Généralités sur les semi-conducteurs
311 - Semi-conducteur du type N
312 - Semi-conducteur du type P
32 - La jonction P N

33 - Dispositifs à semi-conducteur

331 - Redresseurs secs

332 - Diodes à cristaux

34 - Les cellules photoélectriques

341 - Les cellules photoémissives

Cellules à vide photomultiplicateurs-cellules à gaz

342 - Cellules photoconductives

343 - Cellules photovoltaïques

344 - Photodiodes

35 - Les transistors

351 - Etude des paramètres

352 - Effet de la température

353 - Paramètres hybrides

354 - Paramètres fondamentaux

I - GENERALITES SUR L'ELECTRONIQUE

10 - DEFINITION

L'électronique est la partie de la science ou de la technique qui étudie les phénomènes de conduction dans le vide, les gaz ou les semi-conducteurs et qui utilise les dispositifs basés sur ces phénomènes.

La connaissance de l'électronique nécessite l'étude :

- des différents types d'émission électronique,
- des dispositifs de lancement et de contrôle des électrons,
- des tubes électroniques à vide et à gaz, et des transistors,
- des fonctions des tubes électroniques, et des transistors,
- des applications : télécommunications,
  radiodiffusion et télévision,
  téléguidage,
  recherche scientifique,
  électronique industrielle.

Avantages de l'électronique :

- les dispositifs électroniques amplifient. Ils fonctionnent à des vitesses très élevées.
- ils redressent,
- ils se prêtent mieux à l'automatisme,
- certains sont sensibles à la lumière (effets photo-électriques).

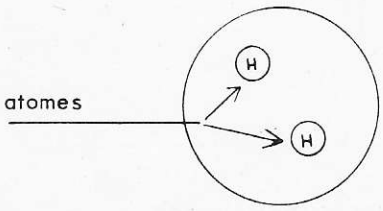
11 - INITIATION A LA PHYSIQUE NUCLEAIRE

CONSTITUTION DE LA MATIERE

La matière n'est pas divisible à l'infini, elle est constituée par des particules extrêmement petites, en perpétuelle agitation appelées molécules.

LA MOLECULE

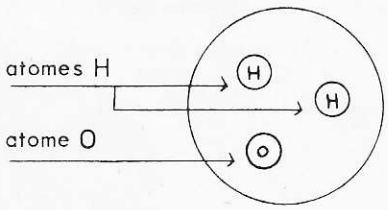
La molécule est la plus petite quantité d'un corps déterminé qui en garde les propriétés.



Molécule d'hydrogène : H_2

Les molécules sont composées d'éléments, ne pouvant plus se décomposer chimiquement , appelés atomes.

Remarque : On appelle corps composés, comme l'eau, tout corps dont les molécules sont formées d'atomes différents.



Molécules d'eau : H_2O

On appelle corps simples, comme l'hydrogène, tout corps dont les molécules sont formées d'atomes identiques.

L'ATOME

L'atome est la plus petite quantité d'un corps pur qui en garde les propriétés.

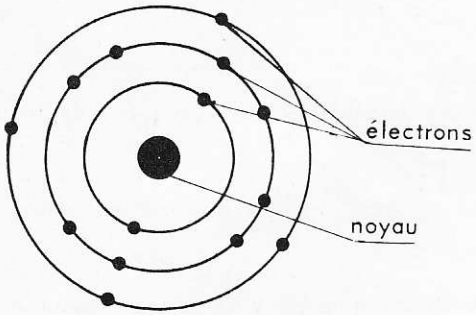
Composition de l'atome

L'atome se compose :

a) du noyau qui représente la presque totalité de la masse de l'atome.

b) des électrons qui gravitent autour du noyau et se répartissent suivant des couches bien définies.

L'électron renferme une charge négative d'électricité.



La charge élémentaire d'un électron, est la quantité d'électricité que contient chaque électron, elle se désigne par la lettre e.

$- e = 1,6 . 10^{-19}$ coulomb.

La masse de l'électron ayant pour valeur $m = 0,910^{-30}$ kg, le noyau peut être divisé lui-même en nucléons qui sont de deux sortes :

- Les neutrons qui ne possèdent aucune charge électrique.
- Les protons qui ont une charge électrique (+ e) égale et opposée à celle de l'électron.

Propriétés de l'atome

1) Un atome est électriquement neutre lorsque chaque proton de charge électrique +e, est équilibré par un électron de charge électrique - e.

2) Certains atomes peuvent perdre ou gagner des électrons, ils deviennent alors des Ions.

- un atome qui gagne un électron devient un ion négatif ou anion.
- un atome qui perd un électron devient un ion positif ou cathion.

3) Les protons et les neutrons constituent par leur association le noyau atomique qui recèle de l'énergie extraordinairement concentrée appelée énergie atomique ou nucléaire.

IDENTIFICATION DES ELEMENTS

Nombre atomique

Les atomes des différents éléments se différencient par leur nombre atomique, qui est le nombre de protons que contient leur noyau et qui détermine l'identité de chaque élément.

Les éléments sont classés suivant la classification de MENDELEEV.

Propriétés chimiques

à) Seul le nombre d'électrons de la dernière couche ou couche périphérique détermine les propriétés de ce corps.

Exemples : - Le sodium et le potassium ont des propriétés analogues car ils n'ont qu'un seul électron périphérique.

- Le fluor et le chlore qui ont 7 électrons périphériques ont des propriétés analogues.

- le néon et l'argon, appelés gaz rares, n'ont aucune propriété chimique car leur dernière couche comporte 8 électrons ; elle est dite saturée.

b) Radio activité

Les phénomènes radioactifs sont des modifications spontanées ou provoquées de la structure des noyaux atomiques.

La structure de certains noyaux se modifie spontanément (uranium), on obtient alors la radioactivité naturelle.

Si l'on provoque par contre, la modification de la structure de certains autres noyaux, on obtient la radioactivité artificielle.

NOMBRE D'AVOGADRO

On appelle atome-gramme d'un corps simple une quantité de ce corps dont la masse, en grammes, est exprimée par le même nombre que la masse atomique de ce corps.

Exemple : un atome gramme de cuivre est une quantité de cuivre de masse 63, 57 g.

Les atomes grammes des différents corps simples renferment tous le même nombre d'atomes N.

N est appelé nombre d'AVOGADRO

$N = 6,02 \cdot 10^{23}$

NOTION DE VALENCE (n)

La valence d'un métal est la nécessité pour un ion de fixer ou d'abandonner n électrons pour se transformer en atome.

On appelle valence gramme le quotient $\frac{A}{n}$

A ⟶ masse atomique du corps

n ⟶ valence la plus élevée de ce corps.

LES DIFFERENTES COUCHES ELECTRONIQUES

L'étude de l'émission de la lumière et des rayons X montre que les électrons se répartissent en plusieurs couches correspondant chacune à une énergie d'ionisation déterminée.

Ces couches sont désignées par des lettres en partant du noyau : K. L. M. N. O. P. Q. Dans cet ordre l'énergie d'ionisation diminue.

Le nombre maximal d'électrons sur chaque couche est limité

- La couche K a au maximum 2 électrons
- La couche L a au maximum 8 électrons
- La couche M a au maximum 18 électrons
- La n ème couche a au maximum $2n^2$ électrons.

Le nombre de couches croît avec le nombre atomique Z.

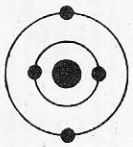
En particulier, chaque couche, à l'exception de la couche K, se divise en sous-couches correspondant à des énergies un peu différentes.

REPRESENTATION SCHEMATIQUE

HYDROGENE

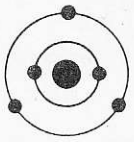
H^{1}_{1}

BERYLLIUM



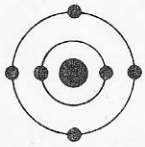
Be^{9}_{4}

BARE



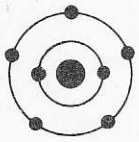
B^{10}_{5}

CARBONE



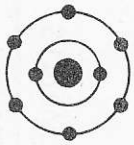
C^{12}_{6}

AZOTE



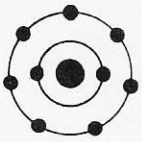
N^{14}_{7}

OXYGENE



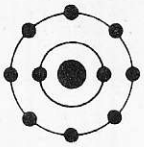
O^{16}_{8}

FLUOR



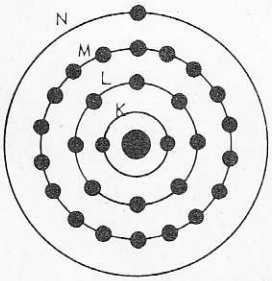
F^{19}_{9}

NEON

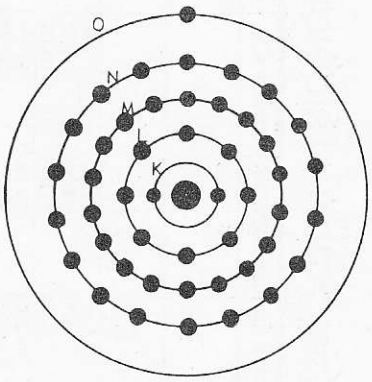


N^{20}_{10}

CUIVRE



ARGENT



La couche N est incomplète (18 électrons)

Symbole chimique $^{A}_{Z}$ X (masse atomique) (nombre d'électrons)

Note : Un milieu cristallin est constitué par la répétition régulière suivant les 3 dimensions de l'espace, d'un groupe d'atomes ou d'ions.

CLASSIFICATION PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

	GROUPE I	GROUPE II	GROUPE III	GROUPE IV	GROUPE V	GROUPE VI	GROUPE VII		GR. VIII	
0									0 **Nn** NEUTRON 1.0087	0
1	1 **H** HYDROGÈNE 1.008								2 **He** HÉLIUM 4.003	1
2	3 **Li** LITHIUM 6.94	4 **Be** BÉRYLLIUM 9.01	5 **B** BORE 10.81	6 **C** CARBONE 12.011	7 **N** AZOTE 14.007	8 **O** OXYGÈNE 15.999	9 **F** FLUOR 19.00		10 **Ne** NÉON 20.183	2
3	11 **Na** SODIUM 22.99	12 **Mg** MAGNÉSIUM 24.31	13 **Al** ALUMINIUM 26.98	14 **Si** SILICIUM 28.09	15 **P** PHOSPHORE 30.974	16 **S** SOUFRE 32.06	17 **Cl** CHLORE 35.45		18 **A** ARGON 39.948	3
4	19 **K** POTASSIUM 39.10 29 **Cu** CUIVRE 63.54	20 **Ca** CALCIUM 40.08 30 **Zn** ZINC 65.37	21 **Sc** SCANDIUM 44.96 31 **Ga** GALLIUM 69.72	22 **Ti** TITANE 47.90 32 **Ge** GERMANIUM 72.59	23 **V** VANADIUM 50.94 33 **As** ARSENIC 74.92	24 **Cr** CHROME 52 SÉLÉNIUM 34 **Se** 78.96	25 **Mn** MANGANÈSE 54.94 35 **Br** BROME 79.91	26 **Fe** FER 55.85 27 **Co** COBALT 58.93 28 **Ni** NICKEL 58.7	36 **Kr** KRYPTON 83.80	4
5	37 **Rb** RUBIDIUM 85.47 47 **Ag** ARGENT 107.87	38 **Sr** STRONTIUM 87.62 48 **Cd** CADMIUM 112.40	39 **Y** YTTRIUM 88.91 49 **In** INDIUM 114.82	40 **Zr** ZIRCONIUM 91.22 50 **Sn** ÉTAIN 118.7	41 **Nb** NIOBIUM 92.91 51 **Sb** ANTIMOINE 121.75	42 **Mo** MOLYBDÈNE 95.94 52 **Te** TELLURE 127.60	43 **Tc** TECHNÉTIUM 99 53 **I** IODE 126.90	44 **Ru** RUTHÉNIUM 101.1 45 **Rh** RHODIUM 102.91 46 **Pd** PALLADIUM 106.4	54 **Xe** XÉNON 131.30	5
6	55 **Cs** CESIUM 132.91 79 **Au** OR 196.98	56 **Ba** BARYUM 137.34 80 **Hg** MERCURE 200.6	57 **La** 58 LANTHANE à 138.91 71 81 **Tl** THALLIUM 204.37	72 **Hf** HAFNIUM 178.5 82 **Pb** PLOMB 207.2	73 **Ta** TANTALE 180.95 83 **Bi** BISMUTH 208.98	74 **W** TUNGSTÈNE 183.85 84 **Po** POLONIUM 210	75 **Re** RHÉNIUM 186.2 85 **At** ASTATE 210	76 **Os** OSMIUM 190.2 77 **Ir** IRIDIUM 192.2 78 **Pt** PLATINE 195.09	86 **Rn** RADON 222	6
7	87 **Fr** FRANCIUM 223	88 **Ra** RADIUM 226	89 **Ac** ACTINIUM 227 96 **Cm** 97 CURIUM à 248 103	90 **Th** THORIUM 232.04	91 **Pa** PROTACTINIUM 231	92 **U** 93 URANIUM à 238.03 95				7

Lanthanides	57 **La** LANTHANE 138.91	58 **Ce** CÉRIUM 140.12	59 **Pr** PRASÉODYME 140.91	60 **Nd** NÉODYME 144.24	61 **Pm** PROMÉTHÉUM (147)	62 **Sm** SAMARIUM 150.35	63 **Eu** EUROPIUM 151.96	64 **Gd** GADOLINIUM 157.3	65 **Tb** TERBIUM 158.9	66 **Dy** DYSPROSIUM 162.50	67 **Ho** HOLMIUM 164.93	68 **Er** ERBIUM 167.3	69 **Tm** THULIUM 168.9	70 **Yb** YTTERBIUM 173.04	71 **Lu** LUTÉCIUM 174.97

Uranides	92 **U** URANIUM 238.03	93 **Np** NEPTUNIUM 237	94 **Pu** PLUTONIUM 242	95 **Am** AMÉRICIUM 243	*Curides*	96 **Cm** CURIUM 246	97 **Bk** BERKELIUM 249	98 **Cf** CALIFORNIUM 251	99 **Es** EINSTEINIUM 254	100 **Fm** FERMIUM 254	101 **Md** MENDÉLÉVIUM 256	102 **No** NOBÉLIUM	103		

I2 - INTERPRETATION ELECTRONIQUE DES PHENOMENES ELECTRIQUES.

GENERALITES

Un corps est CONDUCTEUR lorsque les électrons peuvent se déplacer dans la matière de ce corps sinon, c'est un ISOLANT.

Un corps est chargé positivement ou négativement suivant qu'il manque d'électrons ou qu'il en a en excès. Le champ électrique est produit par cette raréfaction ou cette accumulation d'électrons à la surface du corps.

CONDUCTEURS ET ISOLANTS

L'expérience montre que certains matériaux se laissent parcourir facilement par le courant électrique. Ce sont les matériaux conducteurs. D 'autres offrent une grande résistance au passage du courant, ce sont des isolants.

L'étude de la constitution des atomes permet d'expliquer cette différence de comportement.

CONSTITUTION DE L'ATOME.

Il comporte un noyau central, lourd, électrisé positivement et autour duquel gravitent des électrons ou grains d'électricité négative, répartis sur plusieurs niveaux ou couches d'énergie.

Règle de l'octet : La couche externe d'électrons n'est stable que si elle en comporte 8 ou 0

C'est le cas des gaz rares : Argon - Néon.

Isolant Parfait.

Isolants : Si la couche externe ne comporte que 7, 6, 5 électrons l'atome a tendance à capter 1, 2, 3 électrons pour parvenir à l'état stable.

C'est le cas des métalloïdes : monovalents chlore
: bivalents soufre
: trivalents phosphore

Conducteurs: Si la couche externe ne comporte que 3, 2, 1 électrons l'atome a tendance à les perdre pour parvenir à l'état stable.

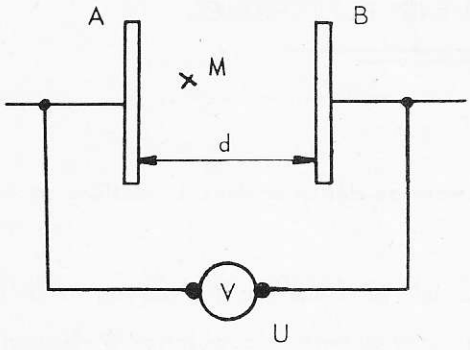
C'est le cas des métaux : monovalents sodium
bivalents cuivre
trivalents aluminium

Conducteurs ou isolants. (semi-conducteurs).

Si la couche externe comporte 4 électrons, l'atome a tendance à les perdre ou à les capter pour parvenir à l'état stable. C'est le cas du carbone et du silicium.

121 - PROPRIETES GENERALES DES ELECTRONS

DEFINITION DU CHAMP ELECTRIQUE :



Si entre 2 plaques A et B séparées par la distance d, on applique une différence de potentiel U, tout point M situé entre A et B aura un potentiel compris entre celui de A et celui de B.
On dit que entre A et B il existe un champ électrique.

Par définition, le champ électrique (que l'on désigne par la lettre E) est la différence de potentiel qui existe entre 2 points distants d'une unité de longueur.

$$E = \frac{U}{d}$$ (U : volts, d : mètres)

E s'exprime en volts par mètre (V/m).

Un électron placé dans un champ électrique est soumis à une force

Cette force a:

- pour direction : la direction de la perpendiculaire commune aux plaques A et B
- pour sens : le sens des potentiels croissants.
- pour point d'application : le centre de gravité de l'électron.
- pour intensité : le produit du champ par la charge de l'électron.

$$F = e \cdot E$$

Newton Coulombs Volt/mètre

L'électron soumis à une force constante, prend une accélération constante $\gamma_{m/s^2} = \frac{F_{(N)}}{m_{kg}}$, son mouvement est uniformément accèléré, sa trajectoire est rectiligne.

Un électron acquiert une vitesse énorme

L'énergie électrique dissipée pendant un tenps t par un courant d'intensité I circulant entre deux points entre lesquels la différence de potentiel U est .

$$W\,(\text{joules}) = U\,(\text{volts}) \cdot I\,(\text{ampères}) \quad t\,(\text{secondes})$$

Pour un électron $I.t = Q$ (coulombs) = charge de l'électron = -e

$$W_{(J)} = e_{(c)} \times U_{(v)}$$

Cette énergie est égale à l'énergie cinétique acquise par l'électron lorsqu'il arrive sur la plaque

$$W_{(J)} = e_{(c)} \cdot U_{(v)} = \frac{1}{2} \underset{(Kg\ m/s)}{m V^2}$$

$$V^2 = \frac{2\,e\,U}{m}$$

$$V = \sqrt{\frac{2\,e\,U}{m}}$$

or $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C ; $m = 0{,}9 \cdot 10^{-30}$ kg

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}}{0{,}9 \cdot 10^{-30}} U} = \sqrt{36 \cdot 10^{10}\ U} = 6 \cdot 10^{5} \sqrt{U}$$

V est exprimé en m/s ; si on l'exprime en km/s .

$$\boxed{V_{(km/s)} = 600 \sqrt{U_{(volts)}}}$$

SENS DU COURANT ELECTRIQUE

Les premiers travaux sur l'électricité ont montré que les effets du courant électrique sont polarisés, c'est à dire qu'ils dépendent de la manière dont on relie les extrémités d'un circuit aux aux bornes d'un générateur.

2 - ETUDE STATIQUE des TUBES à VIDE

20 - GENERALITES sur les TUBES à VIDE .

AGITATION ATOMIQUE

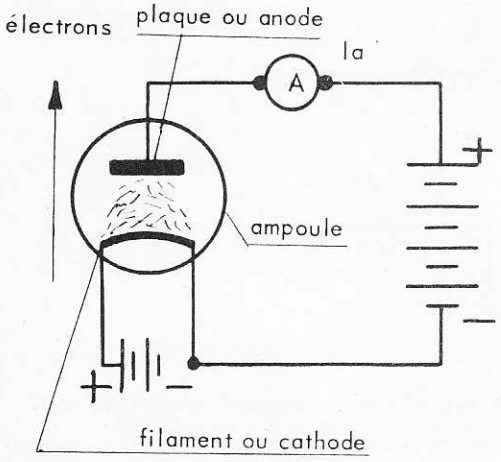
Les métaux sont dotés d'une structure cristalline. Cela veut dire que les atomes s'y trouvent répartis régulièrement comme les mailles d'un filet (Réseau cristallin).

Les électrons extérieurs des atomes d'un métal ne sont pas liés à l'atome, ils sont appelés électrons libres, par opposition avec les électrons liés qui appartiennent toujours à un même atome.

A une température donnée un électron qui se trouve au voisinage de la surface extérieure du métal peut s'échapper s'il possède une vitesse suffisante. Aux températures élevées des électrons sortent du métal en grand nombre. Ils vont former un nuage d'électrons.Le fonctionnement des divers tubes électroniques repose sur l'utilisation d'un tel nuage d'électrons.

Trois procèdés peuvent être employés pour produire une émission électronique

1) Emission thermique



Dans une ampoule vidée d'air se trouve un filament chauffé par effet Joule.

Les électrons libres du filament peuvent s'échapper et occuper l'espace de l'ampoule.

Note :

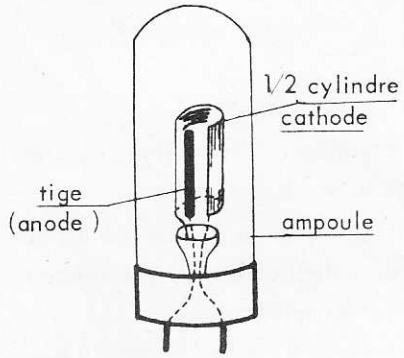
- Plaque ou anode positive, mais filament ou cathode froide Ia = 0

- Cathode chaude, anode négative Ia = 0

- Cathode chaude, anode positive un courant traverse le vide de la lampe.

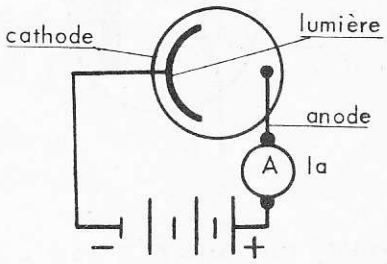
2) Emission photoélectrique

Certains métaux présentent la propriété d'émettre un grand nombre d'électrons s'ils sont frappés par un rayon lumineux parmi ces métaux : le césium déposé sur de l'antimoine.

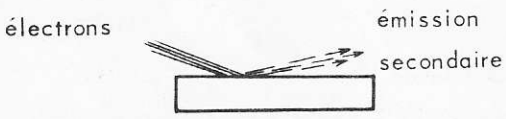


- La lumière extrait des particules d'électricité négative du demi cylindre (cathode) et ces particules (électrons) attirées par la tige positive traversent le vide.

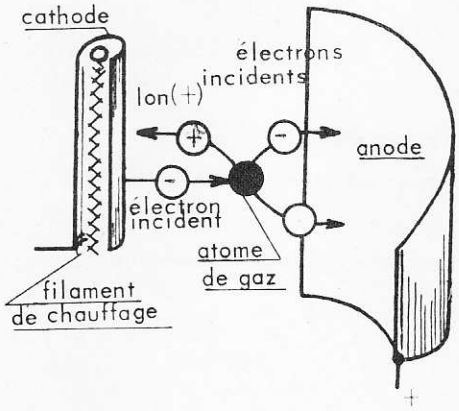
- La lumière est une forme d'énergie



3) Emission secondaire



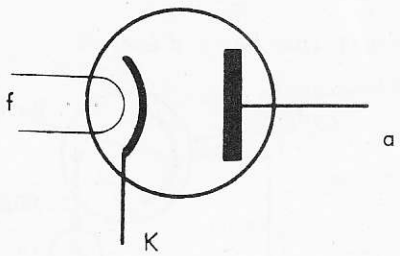
Une autre sorte d'émission est l'émission secondaire ou par bombardement. Si la surface d'un métal bien choisi est frappée par des électrons ou par des ions animés d'une grande vitesse, ces particules primaires vont transmettre leur énergie grâce aux effe ts de choc des électrons superficiels.



- L'ionisation des atomes d'un gaz par le choc des électrons permet d'expliquer la conductibilité des gaz normalement non conducteurs.

201 - ROLE DE LA TENSION ANODIQUE -

DEFINITIONS



a) La surface produisant l'émission électronique est appelée cathode (K).

b) En face de la cathode, la plaque métallique qui est portée à un potentiel positif par rapport à la cathode est appelée anode (a)

c) Ia désigne le courant d'anode (nombre d'électrons par seconde)

Va désigne la tension anodique.

PUISSANCE DISSIPEE SUR L'ANODE

Les électrons remontent le champ électrique produit par l'anode.

L'anode bombardée par les électrons s'échauffe. Lorsque l'électron frappe l'anode et y pénètre, son énergie cinétique se transforme en chaleur pendant le choc. C'est pourquoi la température de l'anode s'élève.

$$P_{(W)} = U_{(V)} \, I_{(A)}$$

La quantité d'électricité débitée est :

$$Q_{(C)} = e \times n \text{ (nombre d'électrons)}$$

L'intensité du courant est :

$$I_{(A)} = \frac{Q_{(C)}}{t\,(s)} = \frac{n \times e}{t}$$

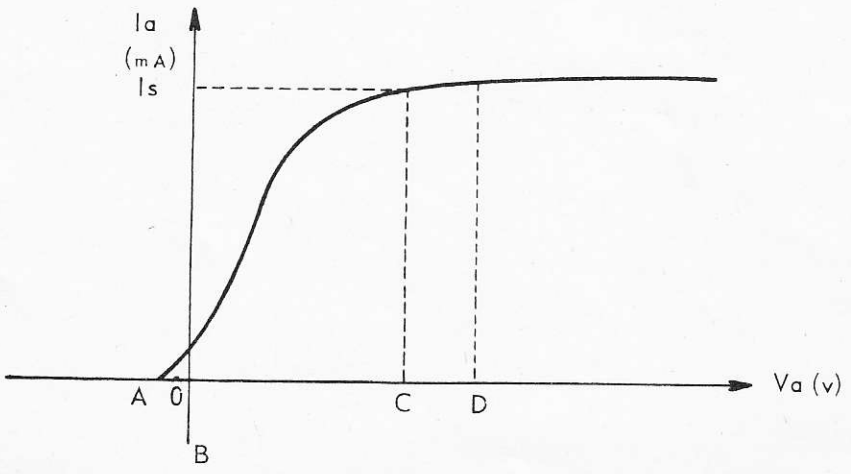
La puissance dissipée sur l'anode est :

$$Pa_{(W)} = U \times \frac{n \times e}{t} = U_{(V)} I_{(A)}$$

ROLE DE LA TENSION ANODIQUE

En l'absence de tension anodique, on constate un courant résiduel.

Pour le supprimer, il faut appliquer une faible tension négative à l'anode.



Zone AB. En A, une tension anodique Va négative est nécessaire pour annuler le courant résiduel.
En B, bien que Va = 0 certains électrons arrivent à l'anode.

Zone BC. Lorsque Va croît, l'anode capte une proportion de plus en plus grande d'électrons émis par la cathode.
Ia croît presque proportionnellement à Va.

Zone CD. Le courant n'augmente plus en fonction de Va. L'anode capte tous les électrons émis par la cathode. Ia est presque indépendant de Va, c'est le domaine de saturation ; (Is est appelé courant de saturation).

Remarque : Le courant de saturation correspond au nombre total d'électrons émis par la cathode en 1 seconde. C'est à dire au pouvoir émissif de la cathode.

CHARGE D'ESPACE

Si la tension anodique est faible, l'anode capte seulement une partie des électrons émis par la cathode, les autres retournent à la cathode après être restés dans l'espace. Il existe constamment entre la cathode et l'anode un nuage d'électrons dont la densité décroît avec la distance.

Ce nuage d'électrons est appelé charge d'espace. Il limite le courant anodique puisque l'anode puise ses électrons dans la charge d'espace.

LOI DE RICHARDSON

D'une façon générale le courant Ia dans un tube est fonction :

- de la nature et de la surface de la cathode
- de la température de la cathode
- de la forme des électrodes
- de la différence de potentiel entre les électrodes

Dans le vide pour un métal chauffé ou pour des cathodes à oxydes on a :

$$Is = AT^2 e^{-\frac{b}{T}}$$

Is densité de courant de saturation en A/cm^2 de surface de cathode chauffée

T température absolue de la cathode en degré Kelvin

zéro absolu = - 273° C
zéro centigrade = + 273° C

A et b sont des constantes dépendant de la nature de la cathode.

e expression de base des logarithmes népériens

$$e = 2{,}718$$

LOI DE LANGMUIR

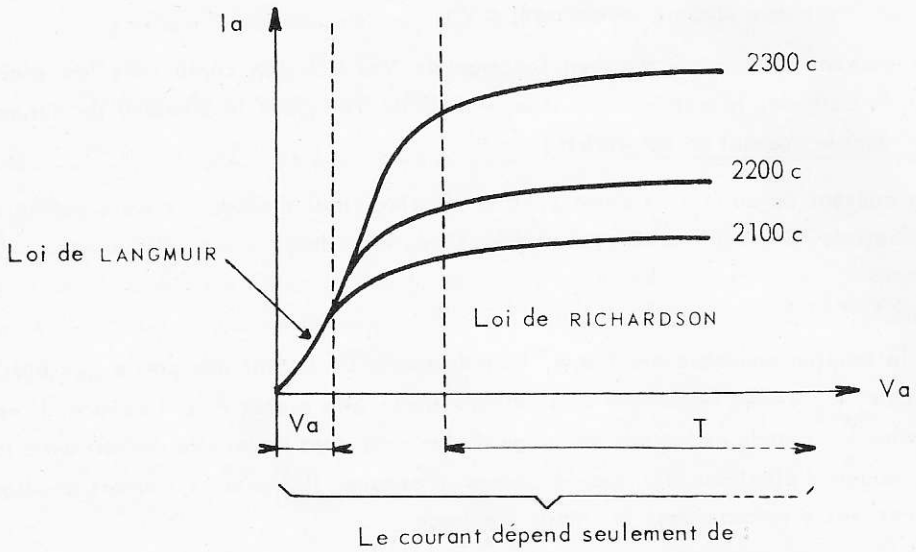
Cette formule permet de connaître le courant Ia en fonction de la tension anodique Va en régime de charge d'espace (avant la saturation)

$$Ia = G\, Va^{\frac{3}{2}} = G\sqrt{Va^3}$$

Ia courant anodique en Ampères

Va tension anodique en volts

G est appelé la pervéance, dépend de la géométrie des électrodes.

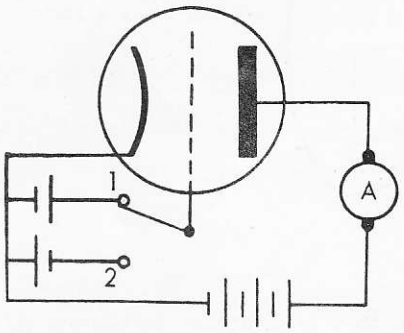


202 - COMMANDE D'UN COURANT ELECTRONIQUE -

Dans un tube à vide l'intensité et la trajectoire d'un courant électronique peuvent être commandés par:

1°) Grille de commande (contrôle du débit)

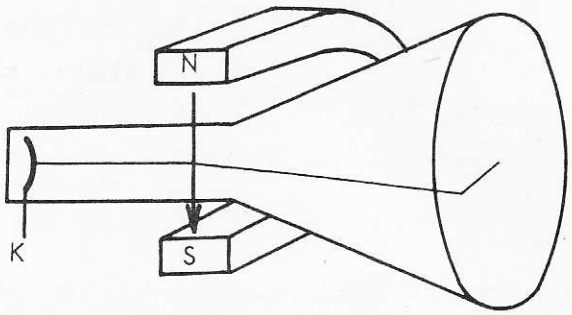
Autour et tout près de la cathode du tube, se trouve une grille qui se présente sous la forme d'un fil spiralé, d'un cylindre percé de trous ou celle d'un grillage métallique.



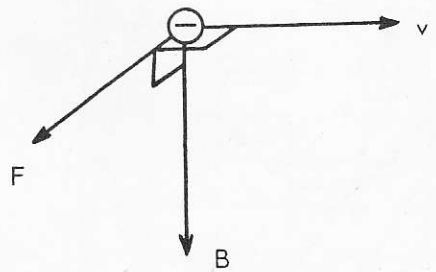
La grille étant portée à un potentiel positif (position 1) ou négatif (position 2) par rapport à la cathode, le courant électronique à l'intérieur du tube augmente dans le premier cas et diminue dans le second.

2°) Champ magnétique

La trajectoire des électrons à l'intérieur du champ est une courbe.



Dans un champ magnétique un électron lancé subit une force dont la direction est perpendiculaire au champ, proportionnelle au champ et à la vitesse



$$F = B\ e\ v$$

F_N (Newton)

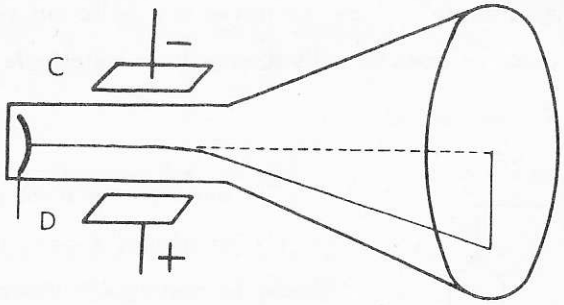
$B_{wb/m2}$ (Weber / mètre carré)

e_c (Coulomb)

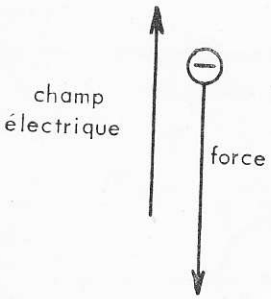
$V_{m/s}$ (mètre / seconde)

3°) Champ électro-statique

La trajectoire des électrons est modifiée à l'intérieur du champ (entre les plaques C et D, plaques de déviation).



Dans un champ électrique un électron subit une force dans la direction du vecteur du champ. Cette force est proportionnelle au champ électrique et indépendante de la vitesse de l'électron.



$$F = e \times E$$

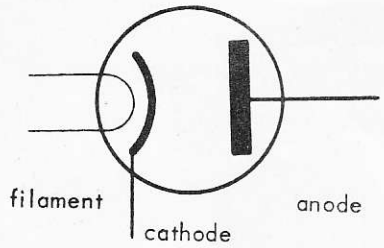
F_N (Newtons)

e_c (Coulombs)

$E_{v/m}$ (volts / mètre)

21 - LE TUBE DIODE

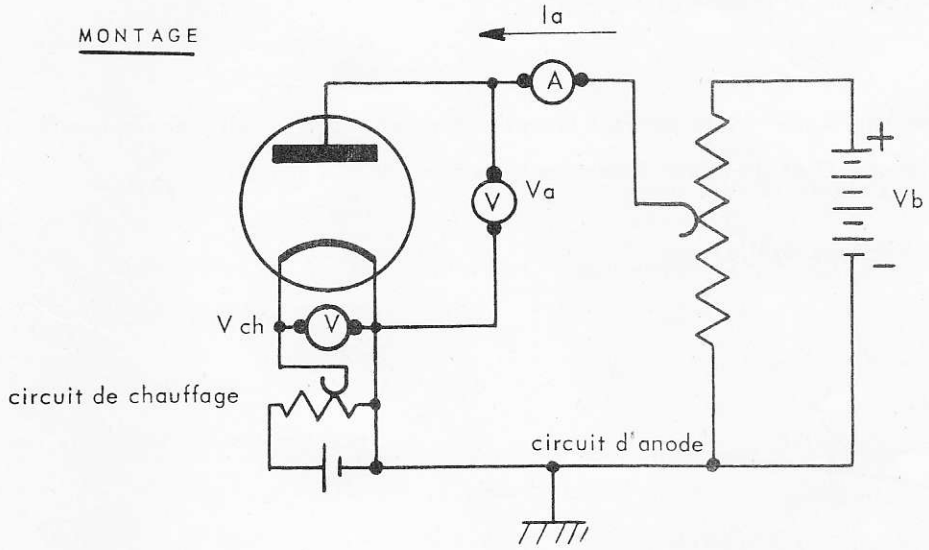
DESCRIPTION



La diode est le plus simple des tubes électroniques. Elle comporte seulement 2 électrodes : une cathode et une anode.

Introduite en série dans un circuit, une diode ne laisse passer le courant que dans un sens. Cet effet de valve pratiquement sans inertie est à la base de toutes les applications des diodes.

MONTAGE

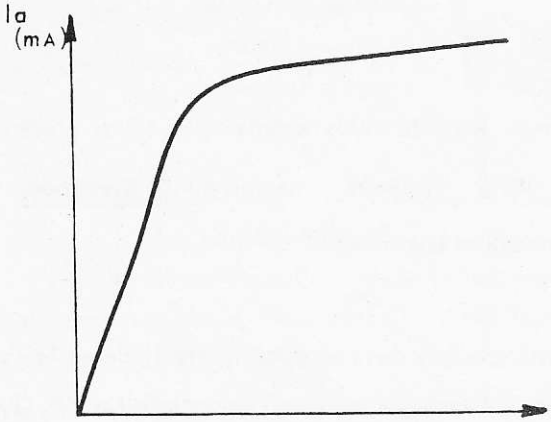


COURBE CARACTERISTIQUE DE LA DIODE

La courbe caractéristique d'une lampe diode permet de connaître la valeur du courant anodique en fonction de la tension appliquée à cette anode . (En faisant varier Va on obtient diverses valeurs de Ia).

a) Influence de la tension anodique :

La tension anodique peut varier de 0 à 300 V, parfois plus, d'où le nom de circuit haute tension



- Va faible : les électrons retournent sur la cathode après en être sortis. On dit qu'au voisinage de la cathode il y a charge d'espace.

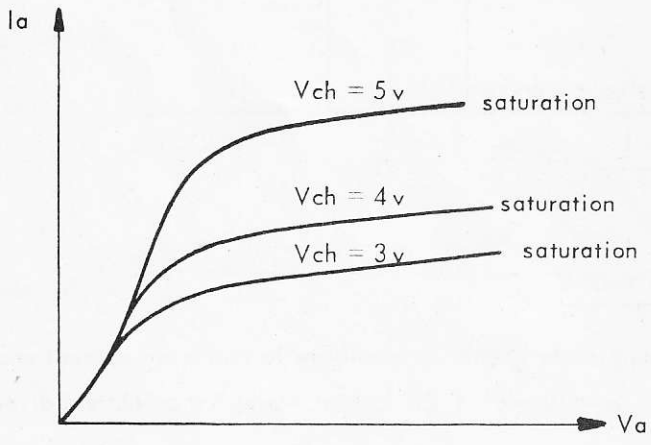
- Va élevée : attraction forte des électrons, saturation.

Les courbes expérimentales montrent l'existence d'une zone intermédiaire de raccordement entre la zone de charge d'espace et la zone de saturation.

Remarque :

La courbe présente une région droite pendant laquelle le courant croît régulièrement quand on fait croître la tension d'anode. C'est la région intéressante au point de vue utilisation.

b) Influence du chauffage du filament :



La tension de la source de courant destinée à porter le filament à l'incandescence est en général de 4 à 6 volts, d'où le nom de circuit basse tension (B T) donné au circuit de chauffage.

Si on augmente la tension de chauffage, on augmente la température du filament et on augmente le courant Ia pour une tension d'anode Va donnée.

Vch est limitée par la température de fusion du filament.

RESISTANCE INTERNE

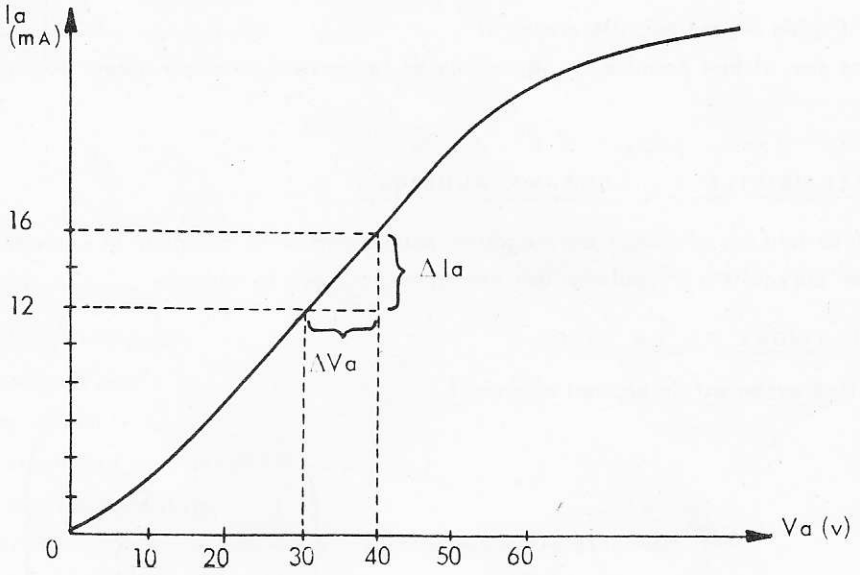
On appelle résistance interne d'un tube la difficulté rencontrée par les électrons pour se rendre de la cathode à l'anode.

Cette résistance est determinée par le quotient d'une petite variation de la tension anodique, par la variation correspondante de l'intensité anodique.

$$\rho \text{ (ohm)} = \frac{\text{Variation de Va en volts}}{\text{Variation correspondante de Ia en ampères}}$$

$$\rho \quad \Omega \quad = \frac{\Delta Va}{\Delta Ia}$$

On appelle résistance interne en un point de la caractéristique $Ia = f(Va)$ la valeur $\frac{\Delta Va}{\Delta Ia}$



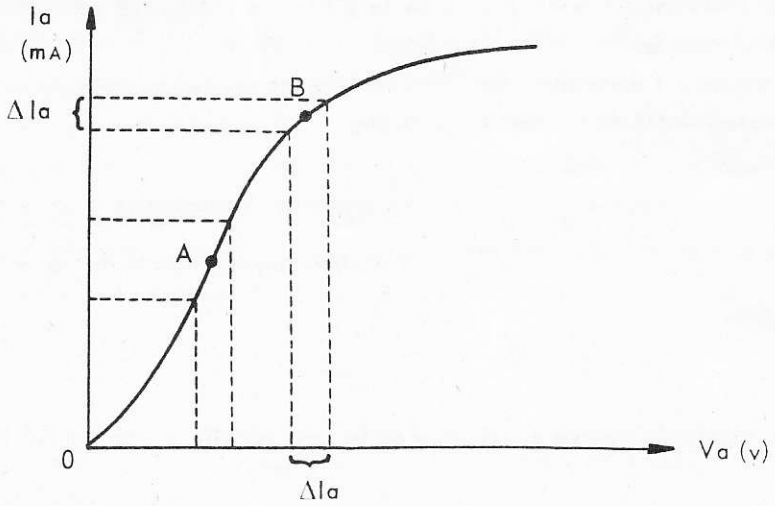
$$\rho = \frac{\Delta Va}{\Delta Ia} = \frac{40 - 30}{(16 - 12)\ 10^{-3}} = \frac{10}{4\ 10^{-3}} = 2{,}5\ 10^{3}\ \Omega$$

Remarques :

1°) Dans les applications normales d'un tube on prend les valeurs dans la partie droite de la courbe caractéristique.

2°) La partie horizontale de la caractéristique correspond à une résistance infinie.

$$\rho = \frac{\Delta Va}{\Delta Ia} = \frac{\Delta Va}{0} = \infty$$



La résistance interne varie avec le point de fonctionnement du tube si la caractéristique Ia = F (Va) n'est pas une droite.
Dans ce cas, il faut prendre les variations de la tension anodique autour du point d'utilisation.

$$\rho \text{ en A} < \rho \text{ en B}$$

IRREVERSIBILITE DU COURANT ANODIQUE

Si la tension anodique est négative par rapport à la cathode, le courant anodique cesse de circuler puisqu'il y a répulsion des électrons émis par la cathode.

APPLICATIONS DE LA DIODE

A) Redressement du courant alternatif

2 Types :
- redressement basse tension (BT) : I = 60 à 600 mA ; U = 300 à 650 V
- redressement haute tension (HT) Kenotron : I = 0,5 à 600 MA ; U = 2,5 à 12,5 KV

ρ = 60 à 200 Ω

B) Détection d'une oscillation (HF) haute fréquence modulée.

1 Type : Détection HF : I = 0,8 à 38 mA ; U = 7 à 30 V

ρ = 40 à 100 KΩ

DIFFERENTS TYPES DE CATHODE

A) Cathode en tungstène

Cette cathode très robuste est utilisée dans des tubes soumis à des tensions anodiques très élevées.

B) Cathode à oxydes.

Ces cathodes sont fragiles et utilisées dans les tubes de petite puissance fonctionnant sous de faibles tensions.

DIFFERENTS TYPES DE CHAUFFAGE

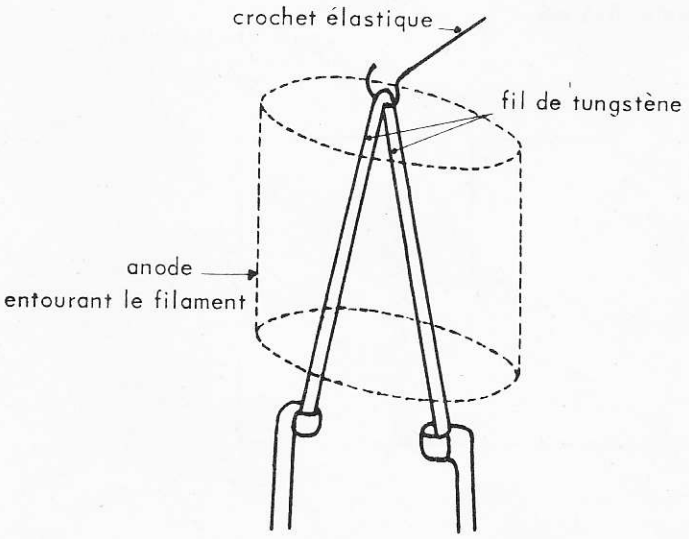
A) Chauffage direct

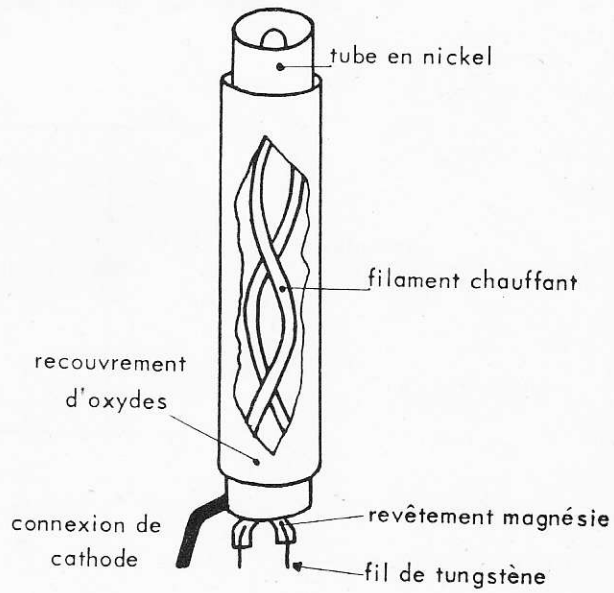
Le filament est constitué par un ruban de métal (tungstène) pouvant être porté à 3500 ou 4000° C sans fondre: Ce filament constitue également la cathode. Il peut être recouvert d'oxydes (barium, strontium, thorium) à fort pouvoir émissif d'électrons.

B) Chauffage indirect.

Le filament est isolé de la cathode par un revêtement de quartz, kaolin ou magnésie à fort pouvoir réfractaire qui crée une inertie calorifique de la cathode.

L'émission électronique est indépendante des variations de courant, ce qui permet de chauffer avec un courant alternatif sans inconvénient.





CONSTITUTION DE L'ANODE

La plaque constituant l'anode est en nickel, molybdène ou en graphite. Pratiquement elle entoure la cathode et communique à l'extérieur par un fil qui lui est soudé.

LIMITES D'UTILISATION DES DIODES

L'emploi d'une diode est limitée par les éléments suivants :

a) Puissance dissipée

Cette puissance apparait sous forme de chaleur dans l'anode

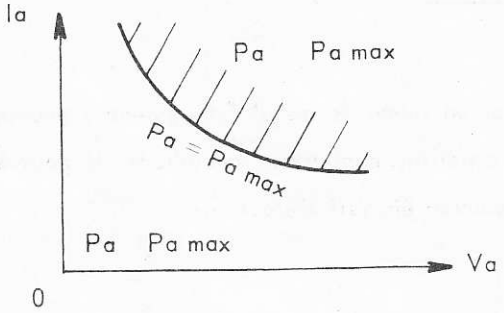
$$Pa = Ia \times Va$$

- Hyperbole de puissance maximale dissipée

C'est la courbe d'équation $Va\ Ia = Pa\ max$

Cette puissance limite le courant Ia ; pour une tension anodique Va on doit avoir :

$$Va\ Ia \leqslant Pa\ max$$



b) Tension inverse

La tension inverse est la tension qui peut se présenter dans le sens non conducteur d'un tube diode.

L'isolement des électrodes ne permet pas de dépasser une certaine valeur indiquée par le constructeur. Ex : Diode 5y3 tension inverse 1550 v max.

c) Courant de pointe : Courant maximal à ne pas dépasser au-delà duquel on risque de détériorer la cathode.

Ex : Diode 5y3 courant de pointe 675 mA

22 - LE TUBE TRIODE

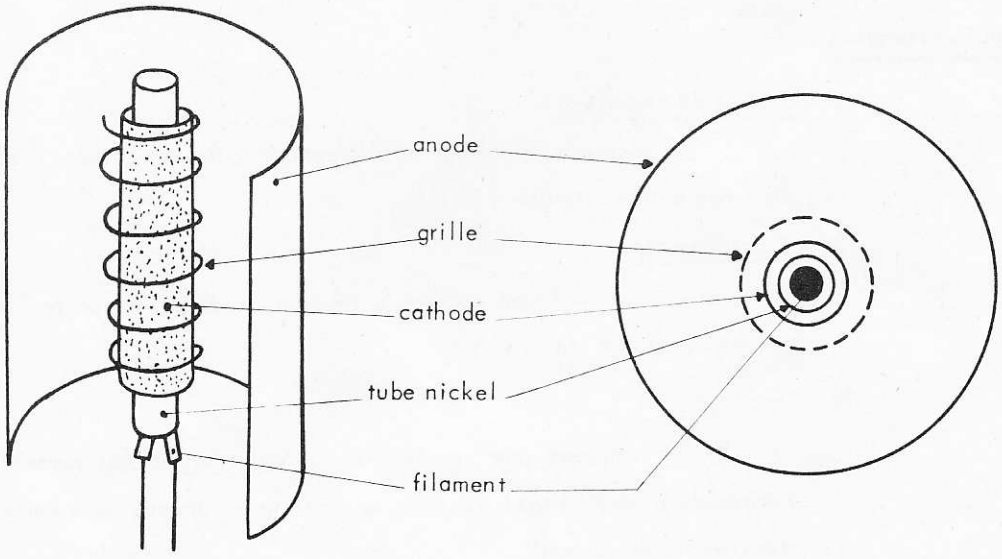
La lampe diode n'amplifie pas tandis que la lampe triode (c'est à dire à 3 électrodes par un perfectionnement de première importance dû à Lee de Forest. 1907) va permettre l'amplification.

L'adjonction de la grille permet de transformer la diode en un relais extrêmement sensible, d'une inertie mécanique réduite à celle des électrons.

CONSTITUTION D'UNE TRIODE.

Le tube triode comprend :

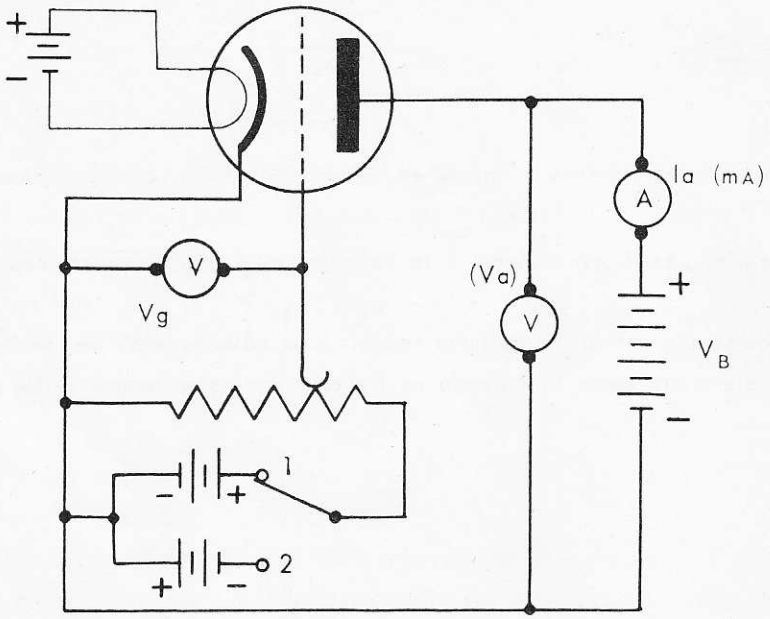
- Une cathode, portée à un potentiel de référence (masse, en général), dont le rôle est d'émettre des electrons.
- Une anode, portée à un potentiel positif par rapport à la cathode, dont le rôle est de capter les électrons.
- Une grille, portée à un potentiel, en général négatif par rapport à la cathode, dont le rôle est de contrôler le passage des électrons entre la cathode et l'anode d'où son nom « grille de commande ».



Le tube triode est semblable à une diode dans laquelle on aurait entre la cathode et l'anode mais plus près de la cathode, placé une grille constituée par une hélice de fil de nickel entourant la cathode sans la toucher.

EFFET DE LA GRILLE . POLARISATION.

Montage permettant d'étudier le fonctionnement de la triode.



Nous remarquons :

1°) Circuit de chauffage

Il assure le chauffage du filament donc de la cathode. Il est indépendant des autres circuits. (B T)

2°) Circuit anode

Il comprend une source de tension anodique qui porte l'anode à un potentiel positif Va . (H T)

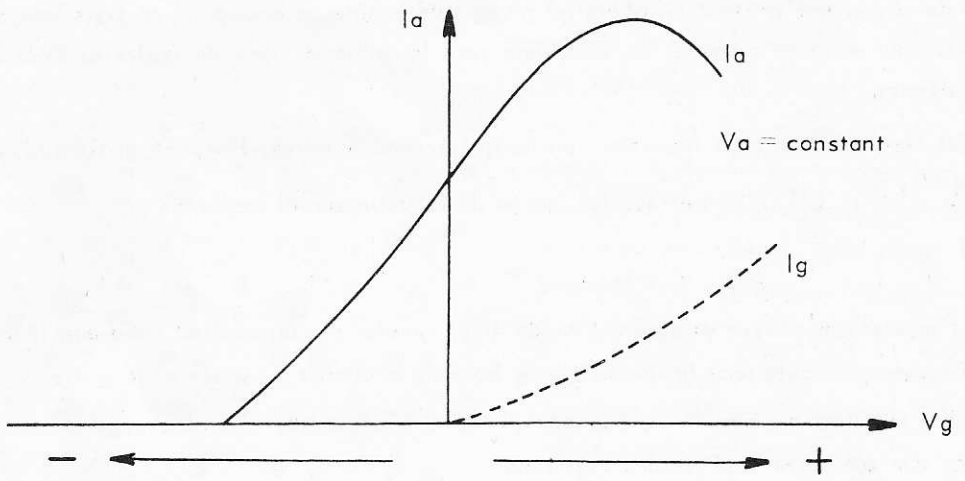
3°) Circuit grille.

Il comprend une source dite de polarisation qui porte la grille de commande à un potentiel qui dans le montage ci dessus peut varier positivement ou négativement.

Remarque :

> Tous les potentiels (anode et grille) sont pris par rapport à la cathode.

VARIATION DU COURANT ANODIQUE EN FONCTION DE LA POLARISATION



1°) Polarisation nulle. (Vg = 0)

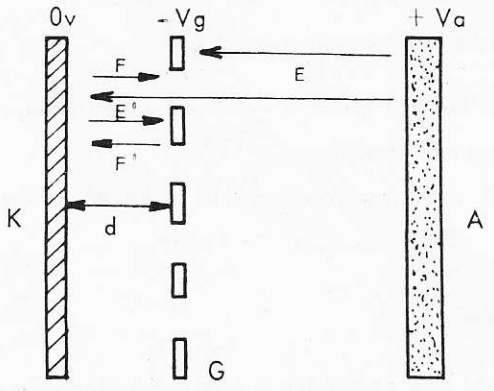
La triode se comporte comme une diode et en a les mêmes effets. La courbe caractéristique peut être comparée à celle d'une diode. La grille n'a aucun effet sur le courant anodique.

Il n'y a pas de consommation d'énergie dans le circuit de polarisation.

2°) Polarisation positive (Vg +)

Le commutateur est sur la position (1). Dans ce cas grille et anode attirent les électrons émis par la cathode. Il se crée un courant cathode grille (Ig) qui diminue le courant anodique (Ia) d'autant plus que Vg augmente. Si Vg est trop positif le courant anodique s'annule. Ce courant intense circulant dans la grille fait rougir celle ci et le tube est rapidement hors service.

3°) Polarisation négative (Vg -)



Nous avons vu que le champ électrique E soumettait les électrons de la charge d'espace à une force F leur permettant d'atteindre l'anode.

Le fait de placer une grille à un potentiel négatif détermine un champ E' en sens inverse de E. Celui-ci a pour effet de refouler les électrons vers la cathode, donc de renforcer l'action de la charge d'espace.

Cet effet sera d'autant plus important que la grille sera négative, l'espace grille cathode faible ($\frac{Vg\ (v)}{d\ (m)} = E'\ v/m$) et que les spires de la grille seront reserrées.

Pour qu'un électron puisse atteindre l'anode et se révèler par un courant anodique il faut qu'il ait une vitesse suffisante pour lui permettre de franchir la charge d'espace et la grille.

Dès que l'électron a traversé le passage difficile, l'action du champ change de sens. La grille fait en quelque sorte le choix des électrons.

- si la grille est très négative :

Tous les électrons sont bloqués, aucun n'arrive à l'anode Ia = 0

La tension pour laquelle Ia = 0 s'appelle tension de blocage ou cut-off (terme anglais qui signifie : tension pour laquelle le courant anodique s'annule)

- si la grille devient de moins en moins négative

Les électrons sont de moins en moins freinés et Ia devient de plus en plus grand.

Nota :

La grille refoule les électrons, donc tant qu'elle reste à un potentiel négatif par rapport à la cathode il n'y a pas courant grille.

Aucune énergie est nécessaire pour modifier le courant anodique

EXPERIENCE :

Considérons le montage réalisé précèdemment, la grille de commande étant au potentiel cathode (Curseur de potentiomètre à fond à gauche) Vg = 0 Volts

Pour une tension Va = 80 Volts, le courant Ia = 7 mA.

Augmentons négativement la tension grille à l'aide du potentiomètre. Le courant Ia diminue et s'annule pour Vg = - 4 volts (Cut-off)

Il suffit d'une tension de 4 volts appliquée sur la grille pour détruire les effets d'une tension anodique de 80 volts.

FONCTIONNEMENT AVEC GRILLE EN L'AIR

Si la grille d'une triode n'est pas connectée à une autre électrode on dit qu'elle est en l'air. Cette grille se charge au potentiel du nuage électronique qui l'environne et réduit le courant électronique d'une façon notable.

Afin d'assurer à la grille un potentiel convenable, on relie à la cathode le circuit grille de cette lampe :

- soit par un court circuit $Vg = 0$
- soit à travers une source de polarisation

En fonctionnement alternatif on dispose dans le circuit grille une résistance de valeur élevée dite résistance de fuite dont l'extrémité inférieure est reliée à la masse.

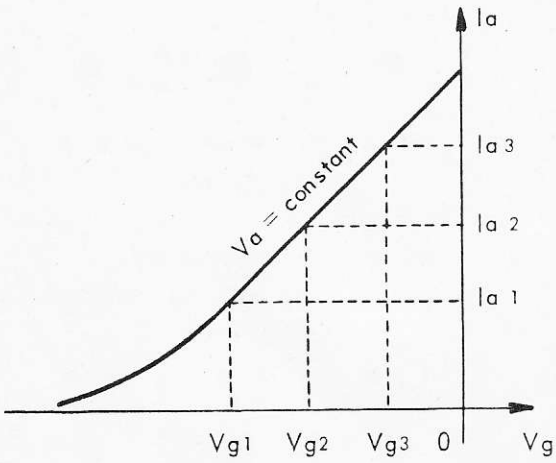
221 - CARACTERISTIQUES -

CARACTERISTIQUE Ia = f (Vg).

En agissant sur la polarisation de la grille de commande tout en gardant la tension d'anode constante, on a la possibilité de faire varier le courant d'anode d'une manière progressive.

Ceci nous amène à réaliser la courbe caractéristique.

Ia = f (Vg) pour Va constant.



Elle comporte :

- une partie courbe
- une partie droite

Dans cette dernière le courant Ia croît linéairement

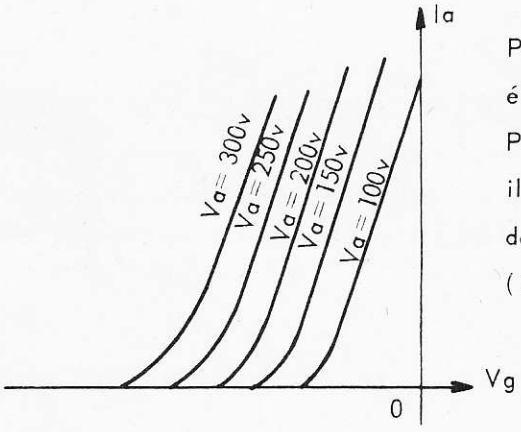
La triode sera correctement utilisée quand les valeurs de Ia et Vg correspondront à la partie rectiligne.

RESEAU DE CARACTERISTIQUE Ia = f (Vg).

Le courant anodique est fonction de Va et de Vg.

Pour connaître plus amplement le comportement du tube employé on réalise plusieurs caractéristiques Ia = f (Vg) pour plusieurs valeurs de Va.

L'ensemble constitue un réseau de caractéristiques Ia = f (Vg) aussi appelé Réseau de grille.



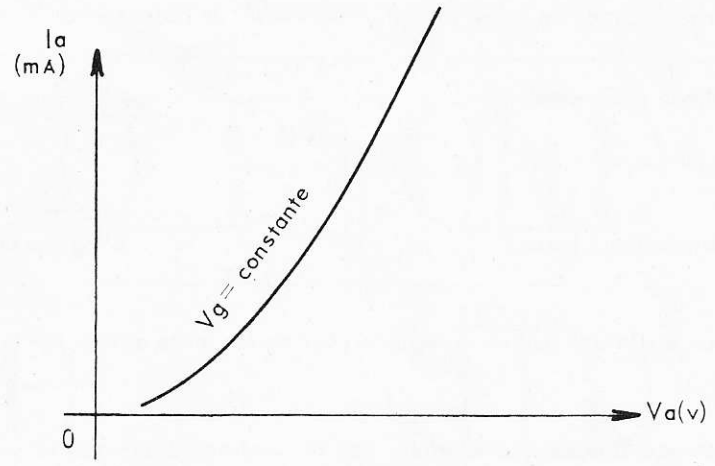
Pour Vg = 0, on a forcèment un Ia d'autant plus élevé que Va est grande.

Pour empêcher les électrons d'arriver sur la plaque, il faudra donc polariser plus négativement la grille de commande.

(Le point de cut-off est plus reculé).

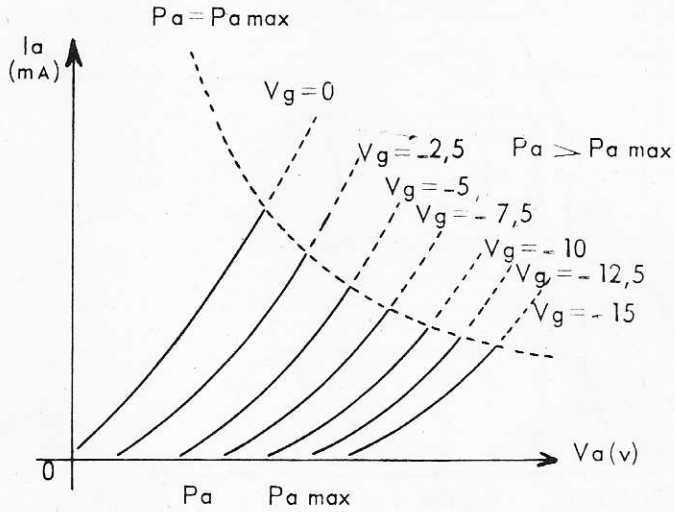
CARACTERISTIQUE Ia = f (Va)

Dans le montage faisons varier maintenant, seulement la tension d'anode (Vg constante). La courbe representant les variations de Ia a la même allure générale que celle d'une diode



RESEAU DE CARACTERISTIQUES Ia = f (Va). (Réseau de Kellog)

On trace ce réseau de caractéristiques Ia = f (Va) aussi appelé Réseau d'anode pour montrer le comportement du tube lorsque la tension grille varie.



Pour établir ce réseau d'anode on trace successivement les caractéristiques Ia = f (Va) en fixant une nouvelle valeur de Vg.

Pour des tensions grille de plus en plus négatives la tension anodique doit être de plus en plus grande pour obtenir le même Ia.

Il en résulte un déplacement vers la droite des caractéristiques mais elles restent sensiblement parallèles.

HYPERBOLE DE PUISSANCE MAXIMUM DISSIPEE.

L'anode bombardée par des électrons s'échauffe.

Pour un type de triode donné, il existe une puissance maximale à mettre en jeu dans le circuit anodique. Cette puissance limite le courant Ia pour une tension anodique Va.

P max = Va × Ia (Représentation figure ci-dessus).

222 - PARAMETRES FONDAMENTAUX

RESISTANCE INTERNE D'UNE TRIODE

Comme pour la diode c'est la difficulté offerte aux électrons pour aller de la cathode à l'anode. Dans le tube triode un autre élément intervient : le potentiel de la grille de commande.

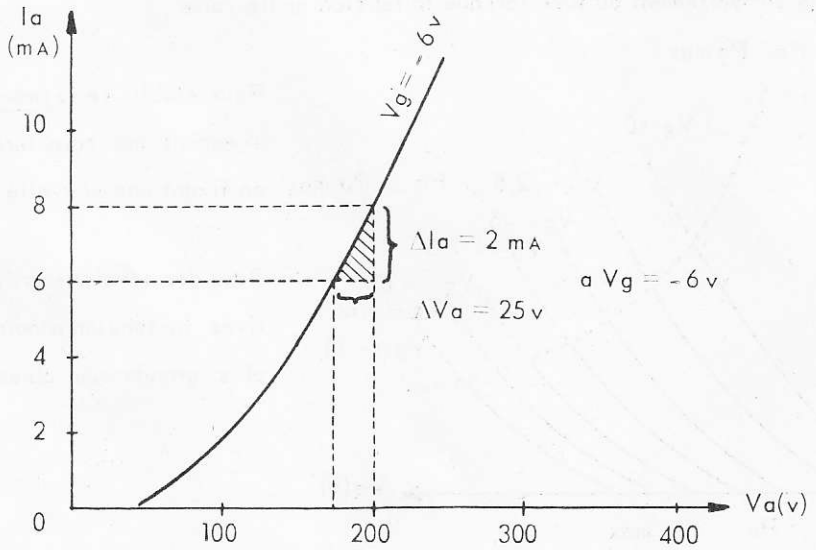
Pour la diode nous avions : $\rho_{\Omega} = \dfrac{\Delta Va\ (V)}{\Delta Ia\ (A)}$

Pour la triode nous aurons : $\rho_{\Omega} = \dfrac{\Delta Va\ (V)}{\Delta Ia\ (A)}$ à Vg constante

La tension grille est rendue invariable pour éviter toute action sur le courant anodique.

DEFINITION

La résistance interne d'une triode est le quotient d'une petite variation de la tension anodique par la variation correspondante du courant anodique, la tension grille restant constante.



D'après la caractéristique Ia = f (Va) à Vg = - 6 V nous déterminons :

$$\rho_{\Omega} = \frac{\Delta Va\ (V)}{\Delta Ia\ (A)} = \frac{25}{2 \cdot 10^{-3}} = 12{,}5 \cdot 10^{3}\ \Omega = 12{,}5\ K\Omega$$

PENTE D'UNE TRIODE

La pente est une caractéristique de la sensibilité de la lampe. Elle nous permet de dire à quelle variation de courant anodique on peut s'attendre pour une variation de tension grille donnée à tension anodique constante.

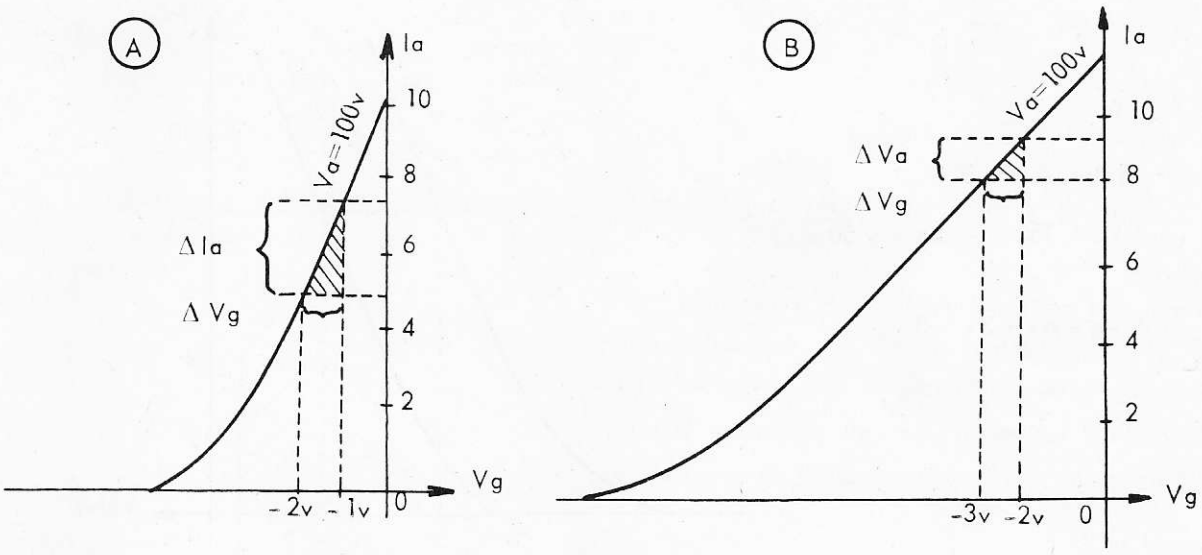
DEFINITION

La pente du tube triode est le quotient d'une petite variation du courant anodique par la variation correspondante de tension grille à tension anodique constante.

$$S = \frac{\Delta Ia\,(A)}{\Delta Vg\,(V)} \quad \text{à Va constante}$$

Elle s'exprime en ampères par volt.

Pratiquement les courants anodiques étant presque toujours exprimés en mA, on exprime la pente en mA par Volt.



D'après les caractéristiques Ia = f (Vg) de ces deux triodes A et B à Va = 100 Volts nous déterminons :

- pour le tube A $\quad S_{(mA/v)} = \dfrac{\Delta Ia\,(mA)}{\Delta Vg\,(V)} = \dfrac{7,5 - 5}{2 - 1} = 2,5\ mA/v$

- pour le tube B $\quad S_{(mA/v)} = \dfrac{\Delta Ia\,(mA)}{\Delta Vg\,(V)} = \dfrac{9,3 - 8}{2 - 1} = 1,3\ mA/v$

S de A > S de B

COEFFICIENT D'AMPLIFICATION D'UNE TRIODE

Pour produire une variation de courant on peut agir :

- soit sur la tension de polarisation Vg
- soit sur la tension anodique Va

Nous avons vu que :

- de faibles variations de Vg provoquent d'importantes variations de Ia
- une importante variation de Va est nécessaire pour produire une même variation de Ia

On dit que la triode est K fois plus sensible aux variations de Vg qu'à celles de Va.

DEFINITION

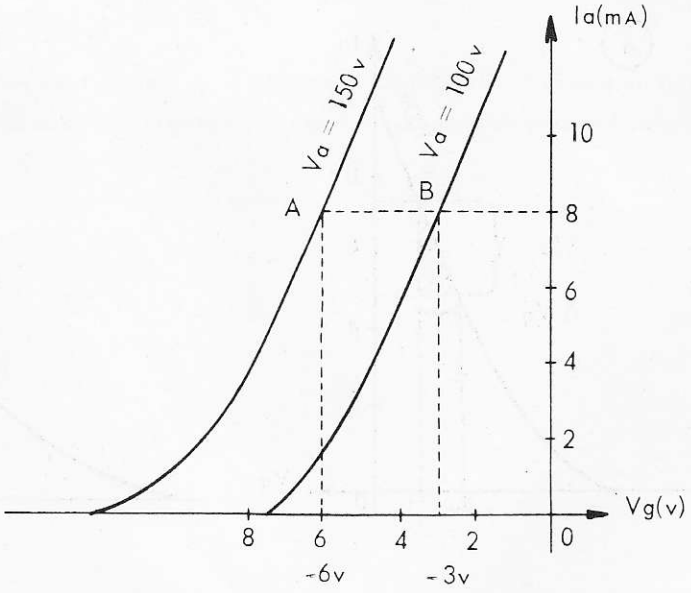
Le coefficient d'amplification (K ou μ), est le quotient d'une petite variation de la tension anodique par la variation correspondante de la tension grille, l'intensité anodique restant constante.

$$\mu = \frac{\Delta Va\ (V)}{\Delta Vg\ (V)} \quad \text{pour la constant}$$

Entre A et B

$\Delta Va = 150\,v - 100\,v = 50\,v$

$\Delta Vg = 6\,v - 3\,v = 3\,v$



D'après le réseau grille, entre les points A et B :

$\Delta Va = 50\,v$ $\Delta Vg = 3\,v$ pour $Ia = 8\,mA$

$$\mu = -\frac{\Delta Va}{\Delta Vg} = \frac{50}{3} = 16{,}66 \simeq 16{,}7$$

Le coefficient d'amplification est le rapport de deux grandeurs de même nature. C'est donc un nombre qui n'a pas d'unité.

PROPRIETES DES PARAMETRES.

Bien que relevés séparément, les réseaux de caractéristiques de grille et d'anode ne sont pas indépendants l'un de l'autre puisqu'ils montrent tous deux le comportement du même tube lorsque Va ou Vg varie.

. A un réseau d'anode correspond un réseau de grille. Les paramètres sont donc liés entre eux.

En effet, si dans les 2 rapports :

$$\rho = \frac{\Delta Va}{\Delta Ia} \qquad \text{et} \qquad S = \frac{\Delta Ia}{\Delta Vg}$$

La variation de courant ΔIa est la même, on peut écrire :

$$\rho S = \frac{\Delta Va}{\Delta Ia} \times \frac{\Delta Ia}{\Delta Vg}$$

$$\rho S = \frac{\Delta Va}{\Delta Vg} = \mu$$

$$\boxed{\mu = \rho S}$$

Cette relation, dite de BARKHAUSEN, est importante car il suffit de connaître 2 des paramètres pour trouver le troisième.

De même il suffit de connaître un réseau de caractéristiques pour reconstituer l'autre

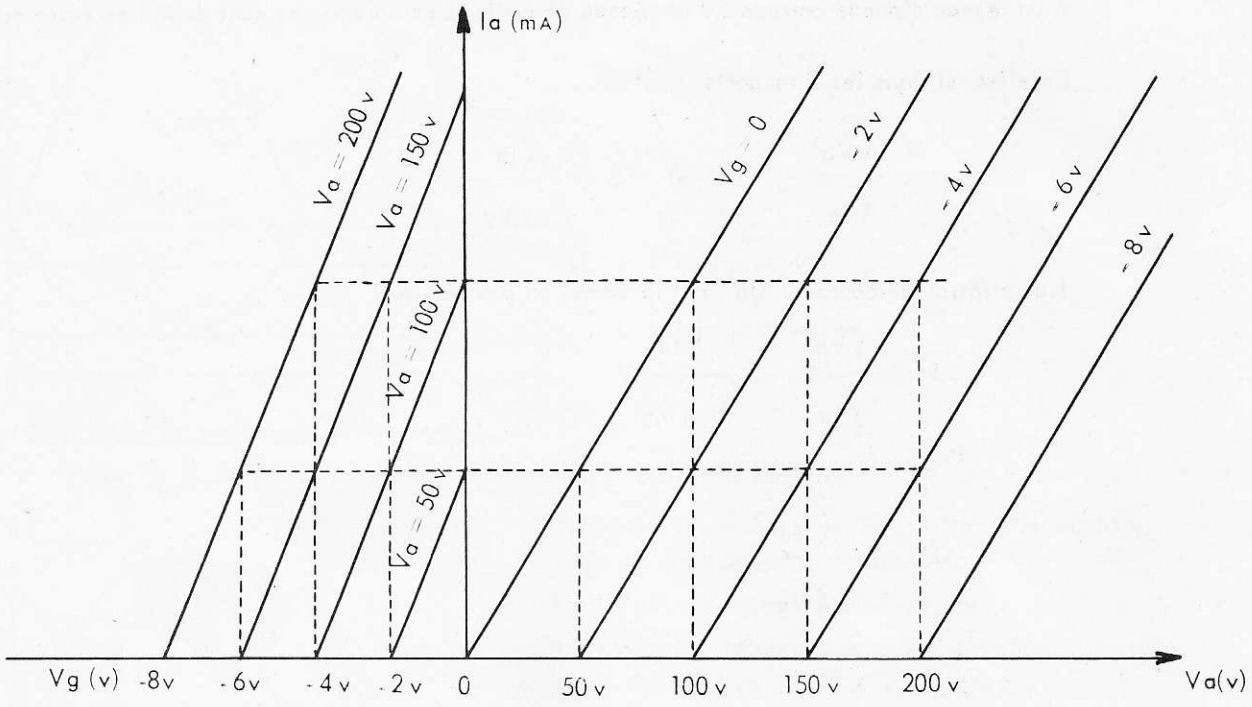
Remarque :

Les paramètres seraient des constantes si les caractéristiques étaient des droites parallèles. En fait, ils dépendent de la valeur de Ia.

Cependant K ou μ est à peu près constant sauf pour des faibles valeurs de Ia.

223 - RESEAU IDEALISE -

Pour résoudre certains problèmes, il est possible de se contenter de solutions approchées, on assimile alors les caractéristiques à des droites parallèles et équidistantes, on obtient un réseau idealisé.



Remarque : Dans un reseau idéalise μ , ρ et S gardent des valeurs constantes.

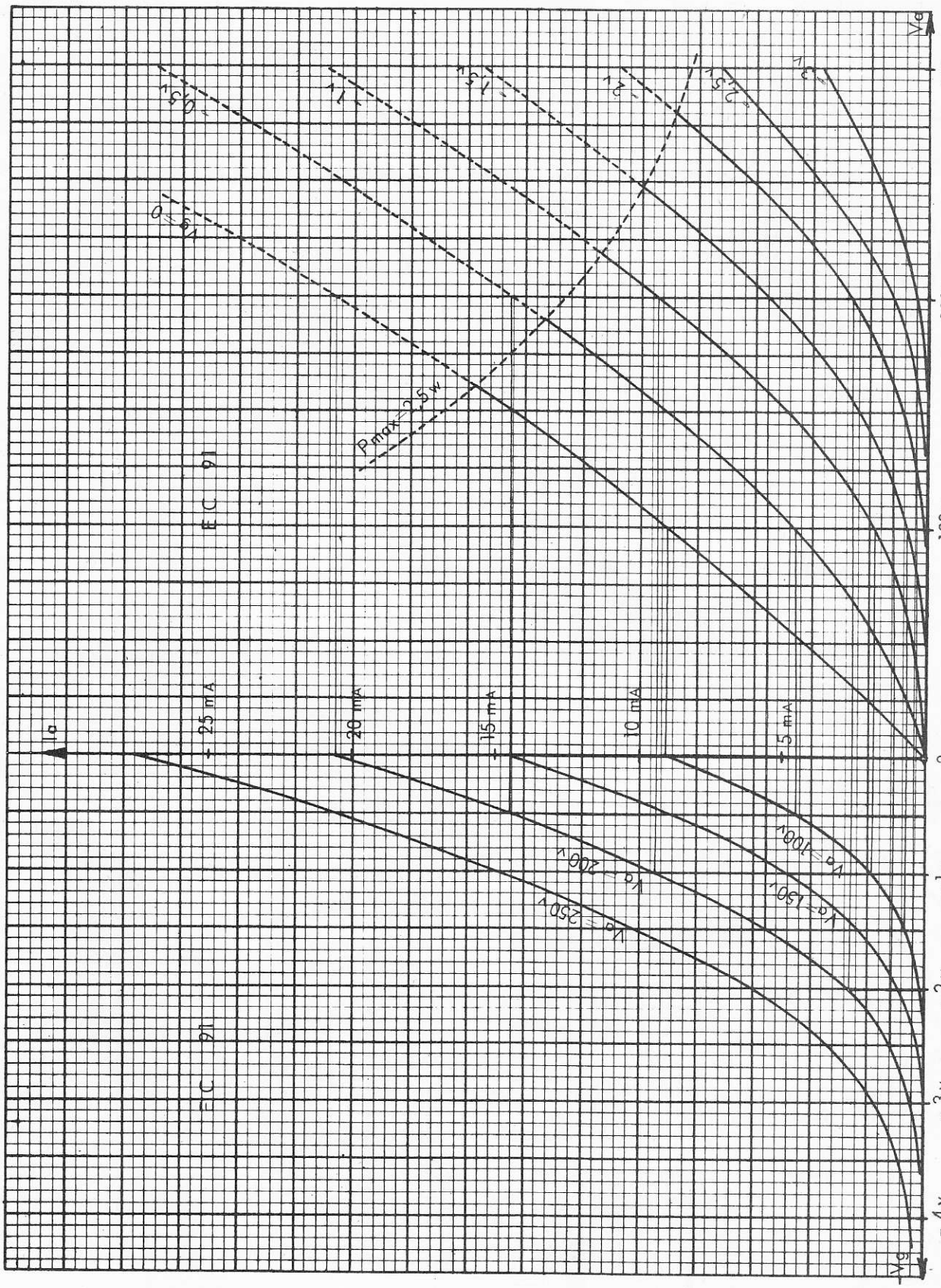
224 - DIFFERENTS TYPES DE TRIODE

On peut distinguer :

- Les triodes amplificatrices de tension.
- Les triodes amplificatrices de puissance.

225 - LIMITATION DES TRIODES

- Courant cathodique.
- Puissance maximale dissipée.
- Fréquence (Cette limitation est due aux capacités inter-électrodes de la triode).

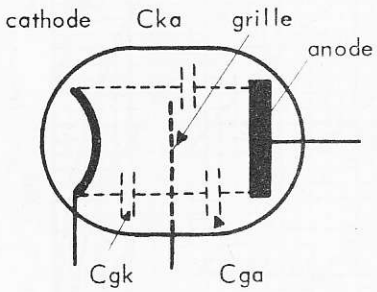


Soit à construire le réseau Ia = f (Vg) d'après Ia = f(Va)

Exemple ci-dessus : tracé de la caractéristique Ia = f (Vg) pour Va = 100 et 200 volts

23 - LE TUBE TETRODE.

INCONVENIENTS DU TUBE TRIODE.



Les électrodes de la triode sont parfaitement isolées dans le vide de l'ampoule.

Or, deux armatures métalliques séparées par un isolant constituent un CONDENSATEUR

Il existe donc entre ces électrodes des capacités de valeur non négligeable.

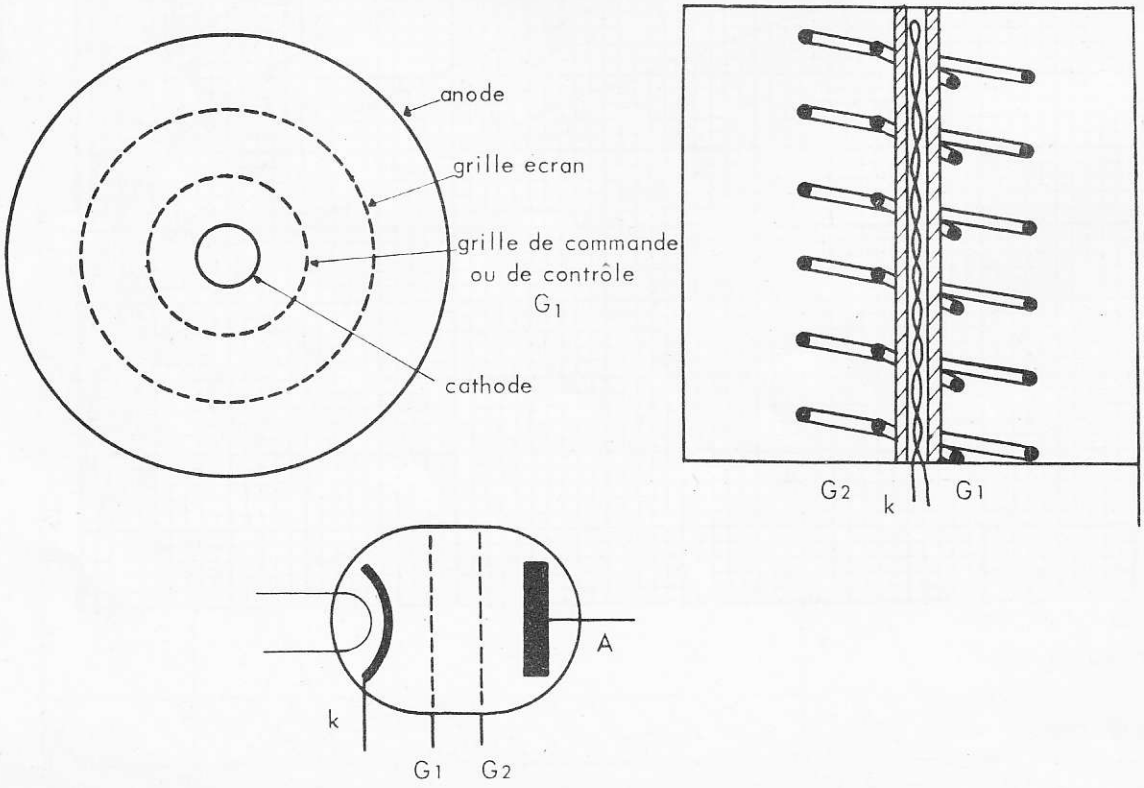
- Capacité cathode grille Cgk
- Capacité cathode anode Cak
- Capacité grille anode Cga

Cette dernière capacité Cga présente l'inconvénient majeur du tube :

ne plus amplifier pour les fréquences élevées.

Pour remédier à cet inconvénient, on intercale un blindage entre grille et anode. On constitue ainsi un tube tétrode c'est à dire à 4 électrodes.

CONSTITUTION D'UN TUBE TETRODE.



Le blindage prend le nom de grille écran G2 alors que la première grille G1 est appelée grille de commande ou de contrôle

G2 sera une grille en hélice à pas très lache, car elle doit constituer un blindage, mais ne doit pas s'opposer au passage des électrons attirés par l'anode

G2 est maintenue à un potentiel positif constant, egal ou inférieur à celui de l'anode

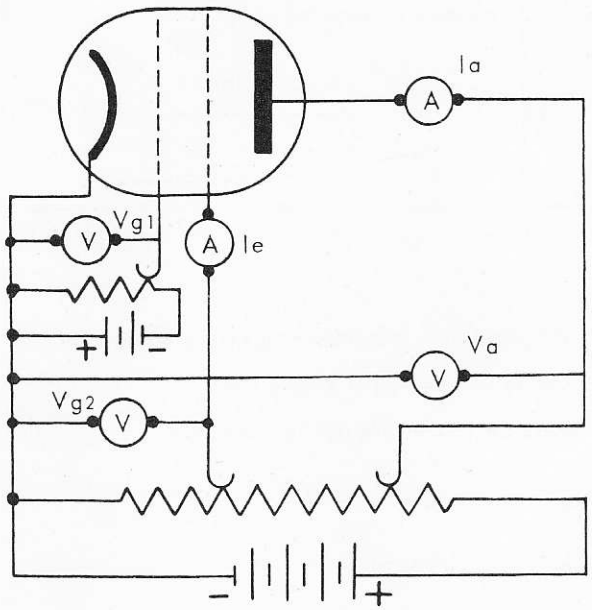
G2 joue le rôle d'un écran électrostatique

La capacite Cga est fortement diminuée

Exemple 6 J 7 en triode $C_{ga} \simeq$ 2 pF

en tétrode $C_{ga} \simeq$ 0,005 pF

FONCTIONNEMENT D'UNE TETRODE



G1 est portée à une tension négative variable (Vg par rapport à la cathode)

G2 est à une tension $>$ 0 (Ve ou V_{g2} par rapport à la cathode)

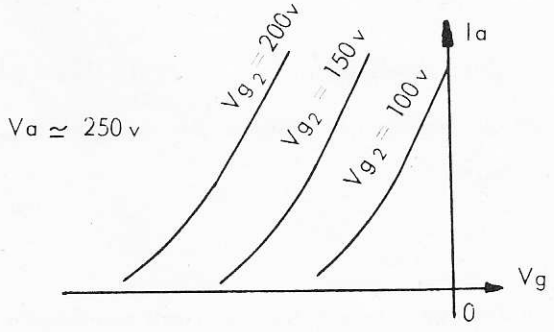
G2 produit dans la zone cathode grille écran un champ accelerateur

Va a très peu d'influence sur ce champ Le flux d'électrons arrivant sur G2 dépend peu de Va, il est déterminé par V_{g2}

Une petite partie de ces électrons est collectée par G2, mais la majeure partie vient frapper l'anode

CARACTERISTIQUES D'UNE TETRODE

a) Caractéristique de grille

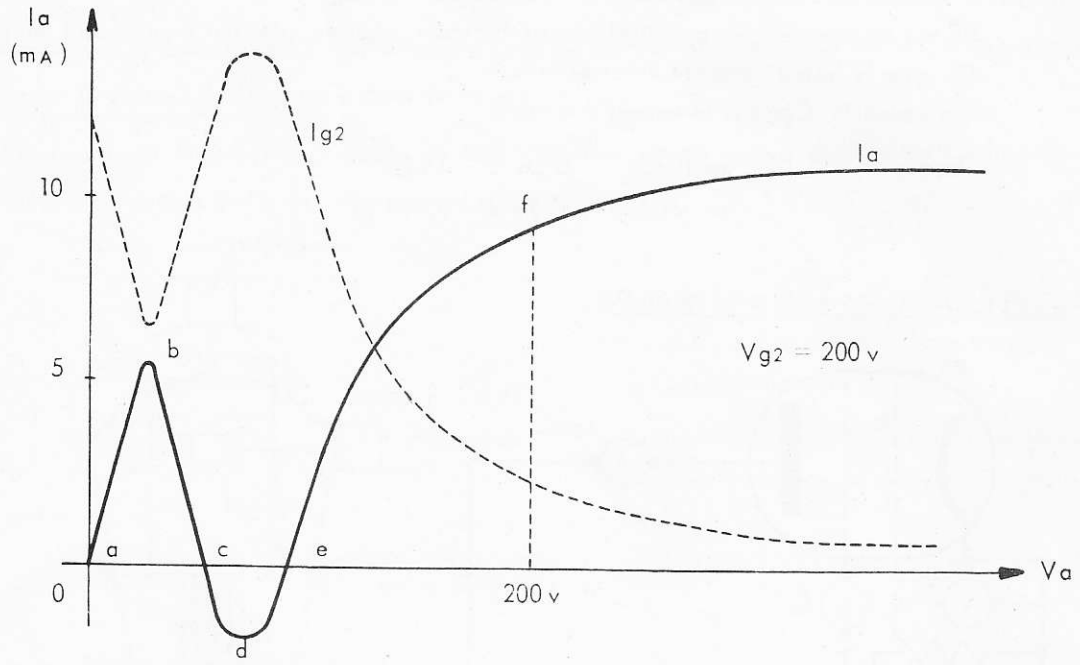


On obtient une forme similaire à la caractéristique d'une triode avec Va et Ve constantes Cependant, l'action de Va sur Ia est très réduite

La pente d'une tetrode à une valeur peu différente de celle d'une triode

b) Caractéristique Ia = (f) Va.

On fixe la tension grille et écran. On relève ainsi la caractéristique suivante :

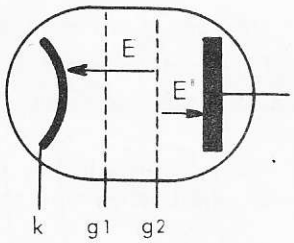


La forme bien particulière de la courbe est dûe au phénomène d'émission secondaire.

L'énergie cinétique de l'électron est fonction de la vitesse qu'il a acquise.

En pénétrant dans l'anode, il libère des électrons de la matière qui la constitue.

Ce sont des électrons secondaires.



Lorsque Va = 0

On constate l'existence du champ électrique.

E entre g2 et K

et E' entre g2 et a

Explication du Phénomène d'émission secondaire.

de (a) à (b) $Va < Vg2$.

Les électrons remontent le champ E, arrivés en g2 (la vitesse en km/s $= 600 \sqrt{Ve}$).

De g2 à l'anode, ils descendent le champ E' ce qui provoque le freinage. Arrivant sur l'anode à faible vitesse il n'y a pas extraction d'électrons secondaires.

de (b) à (c)

E' est toujours de même sens, mais son intensité diminue. Les électrons arrivant sur l'anode plus rapidement, des électrons secondaires sont émis et remontent le champ E'.

De ce fait, diminution de Ia. augmentation de Ie.

en (c)

Il y a autant d'électrons primaires qui pénétrent dans l'anode qu'il y a d'électrons secondaires qui en sortent.

$$Ia = 0$$

de (c) à (e)

E' diminue encore.

Un électron primaire extrait plusieurs électrons secondaires qui reviennent sur l'écran.

Ia s'inverse.

En (d) le courant inverse est maximum ; au-delà de (d) E' a continué de diminuer, les électrons primaires sont moins freinés et pénétrent plus profondément dans l'anode. Les électrons secondaires sont moins facilement extraits ; leur nombre diminue en (e).

Il y a une nouvelle fois autant d'électrons primaires et secondaires.

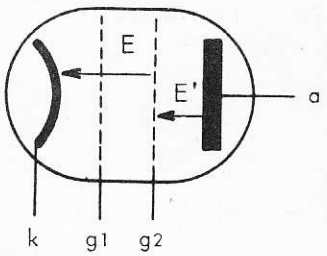
de (e) à (t)

E' diminue toujours.

Les électrons pénétrent de plus en plus profondément dans l'anode et les électrons secondaires qui en sortent sont de moins en moins nombreux.

en (f)

E' change de sens.



Les électrons secondaires sont rappelés par l'anode.

Malgré ce fait, le courant anodique n'augmente plus, parce que g2 constitue un écran statique qui empêche E' de se faire sentir dans l'espace : cathode grille écran.

REMARQUES

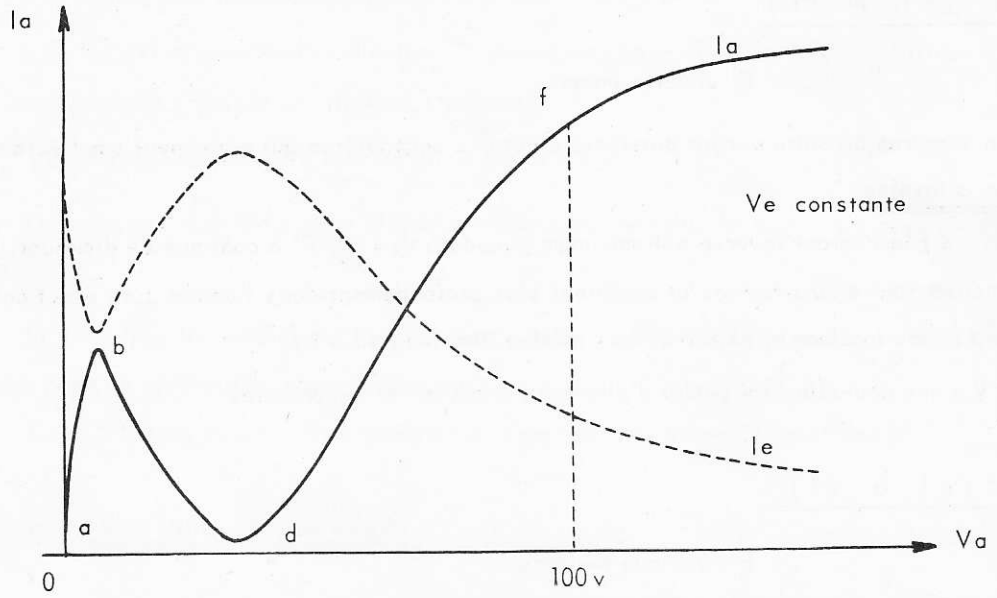
1°) Ie varie en sens inverse de Ia.

La tension Ve constante détermine un débit de cathode constant.

$$Ik = Ia + Ie = \text{constante}$$

2°) des caractéristiques relevées pour des Ve différentes, l'allure des courbes Ia = f (Va) ne change pas.

Cependant si Vg2 est plus faible, les électrons ne sont pas animés de vitesse suffisante pour qu'il y ait inversion de Ia.



3°) Résistance interne ρ

Elle varie avec la tension anodique.

$$\rho_{\Omega} = \frac{\Delta Va\ (V)}{\Delta Ia\ (A)} \qquad \text{(pour Vg et Ve = constantes)}$$

- de (b) à (d) $\frac{\Delta Va\ (V)}{\Delta Ia\ (A)}$ est négatif

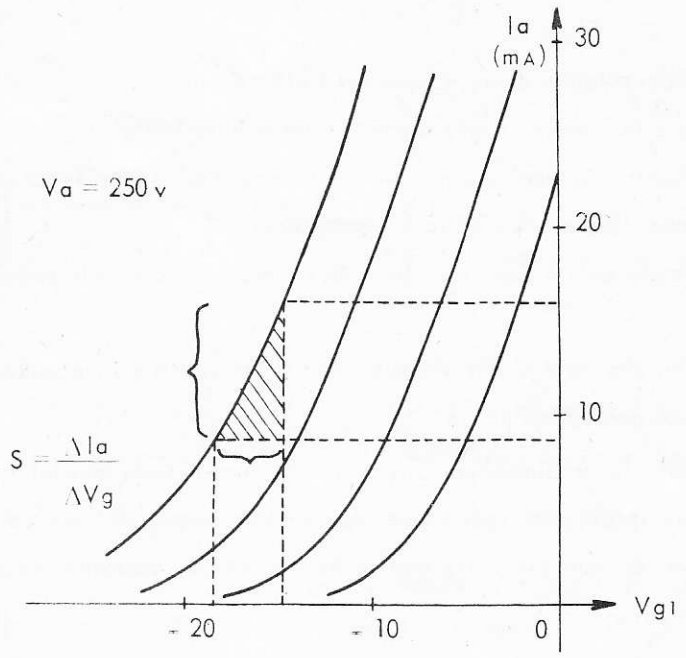
La résistance interne est dite négative, cet effet est appelé : EFFET DYNATRON

- à partir de f la résistance interne est très grande. En pratique, elle peut varier de 1,5 à 2 MΩ

4°) S étant du même ordre de grandeur que pour la triode,

$\mu = \rho S$ est très grand.

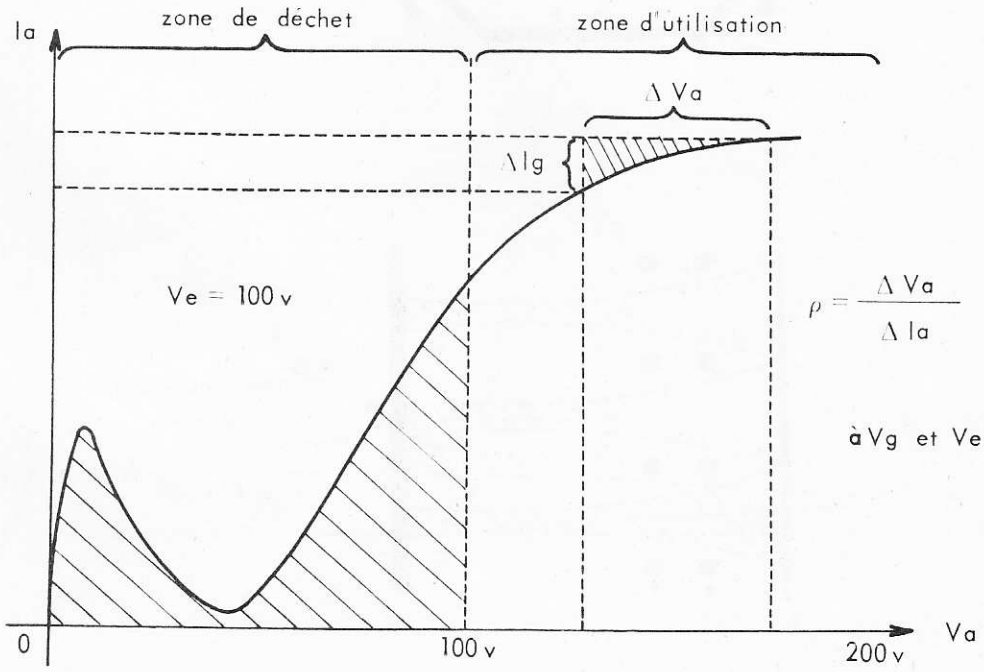
RESEAU DE GRILLE - PENTE -



Le réseau de grille (Ia = f (Vg) est réalisé en maintenant la tension anodique constante. Chaque caractéristique est relevée en faisant varier la tension grille de commande pour une valeur déterminée de la tension d'écran.

Remarque : Cathode, grille de commande et grille écran constituent une véritable triode.

CARACTERISTIQUE D'ANODE . RESISTANCE INTERNE.



231 - TETRODE A FAISCEAUX DIRIGES -

GENERALITES

L'inconvénient majeur d'une tétrode est l'effet dynatron.

La tétrode à faisceaux dirigés a pour but de réduire l'effet dynatron.

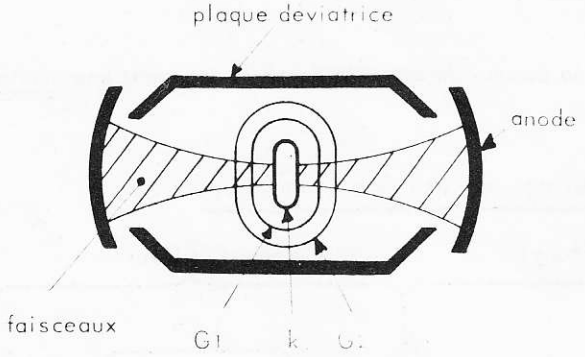
L'effet dynatron a pour origine un phénomène d'émission secondaire : le choc des électrons arrivant sur l'anode libère des électrons secondaires.

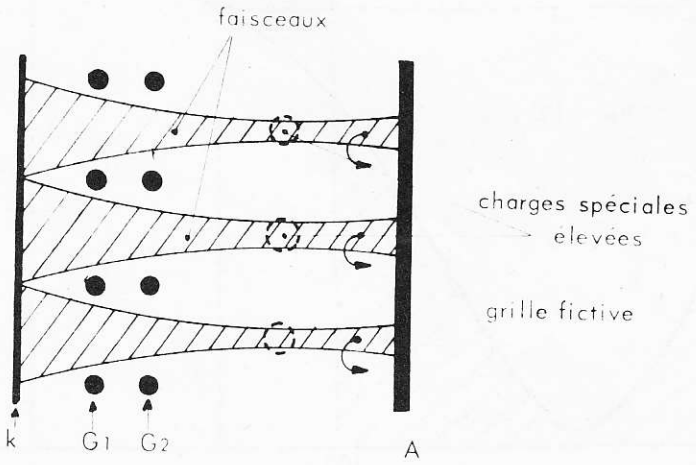
Ce phénomène existe dans tous les tubes mais il présente peu d'inconvénient pour la triode et la diode.

Dans la tétrode si V_{g2} est supérieure à Va les électrons secondaires sont captés par l'écran et il en résulte une diminution de Ia.

On a résolu le problème par une structure particulière des électrodes grâce à laquelle les électrons émis par la cathode sont concentrés en faisceaux et créent entre G_2 et l'anode une charge d'espace négative, en quelque sorte une grille fictive qui empêche les électrons secondaires de revenir jusqu'à l'écran.

PARTICULARITES DE CONSTRUCTION D'UNE TETRODE A FAISCEAUX DIRIGES -





1) une anode de forme spéciale.

2) une grille g1 de forme sensiblement ovale.

3) une grille g2 assez peu serrée dont toutes les spires se trouvent dans le prolongement exact de celles de G 1.

La grille écran est alignée avec la grille de commande de sorte que les faisceaux électroniques soient bien définis et fournissent une importante concentration de charges spatiales entre a et G2.

4) une cathode aplatie favorisant une émission dirigée.

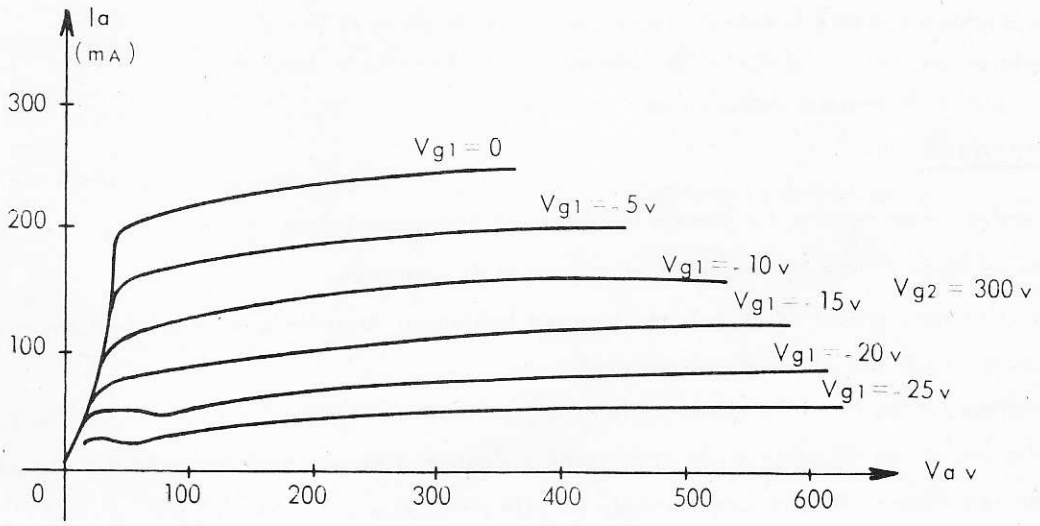
5) deux plaques latérales (généralement réunies à la cathode)

Elles ont pour but de concentrer latéralement le faisceau pour accentuer l'effet des grilles. Les électrons secondaires sont émis en face des charges spatiales qui les repoussent vers l'anode

6) une distance anode cathode optimale pour laquelle la forme caractéristique de la courbe

Ia f (Va) est la meilleure

COURBE CARACTERISTIQUE



AVANTAGES

- Le crochet n'existe plus sauf pour les faibles courants car à ce moment la charge spatiale n'est pas assez importante.

- Le coude très prononcé correspond à une faible tension anodique

- faible courant grille ($Ig2 < \frac{1}{10}$ Ia environ)

Le rendement est amélioré.

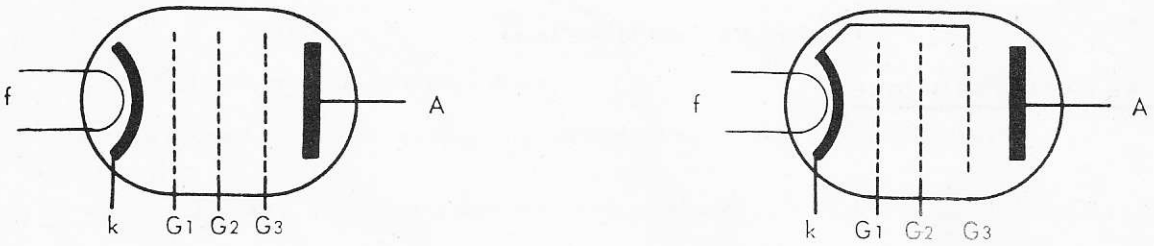
24 - LE TUBE PENTODE

GENERALITES

La tétrode ayant pour inconvénient majeur l'effet dynatron, on améliore son rendement en lui ajoutant une 3ème grille G_3 appelée grille d'arrêt ou grille suppresseuse.

Au lieu d'avoir une grille fictive, comme dans la tétrode à faisceaux dirigés, dont la force de répulsion est variable en fonction du courant, cette 3éme grille aura une force de répulsion constante qui supprimera le léger crochet en cas de faible courant.

CONSTITUTION D'UNE PENTODE



La grille d'arrêt à pas très lâche est placée entre la grille écran et l'anode.

Dans certaines pentodes elle est reliée intérieurement à la cathode. Dans d'autres, elle est sortie ce qui permet de réaliser des montages spéciaux.

FONCTIONNEMENT

La grille d'arrêt renvoie sur l'anode les électrons secondaires émis par celle-ci.

Tout se passe comme si l'émission secondaire était supprimée.

Les électrons venant de la cathode traverse facilement la grille d'arrêt car leur énergie est très supérieure à celle des électrons secondaires.

Les électrons lancés ayant franchi la grille écran, quoique ralentis entre l'écran et la grille d'arrêt passent entre les spires de cette grille et arrivent à l'anode. Les électrons secondaires sortant de l'anode avec des vitesses faibles sont renvoyés sur elle par le champ G_3 a

Remarque :

Dans certaines pentodes on renforce l'action de la grille d'arrêt en utilisant la charge spatiale comme dans une tétrode à faisceaux dirigés.

PROPRIETES

La pentode possède les mêmes propriétés que la tétrode.

- Pente : égale à quelques mA/v comme pour la triode.

- grille écran

a) elle diminue la capacité Anode - grille de commande

b) elle accélère les électrons et les extrait de la charge d'espace au profit de l'anode.

Ia important pour Va faible

- grille d'arrêt supprime l'émission secondaire.
- anode Va a très peu d'influence sur Ia.
- résistance interne très grande puisque Ia varie peu en fonction de Va(plus élevée que pour la tétrode.)
- coefficient d'amplification

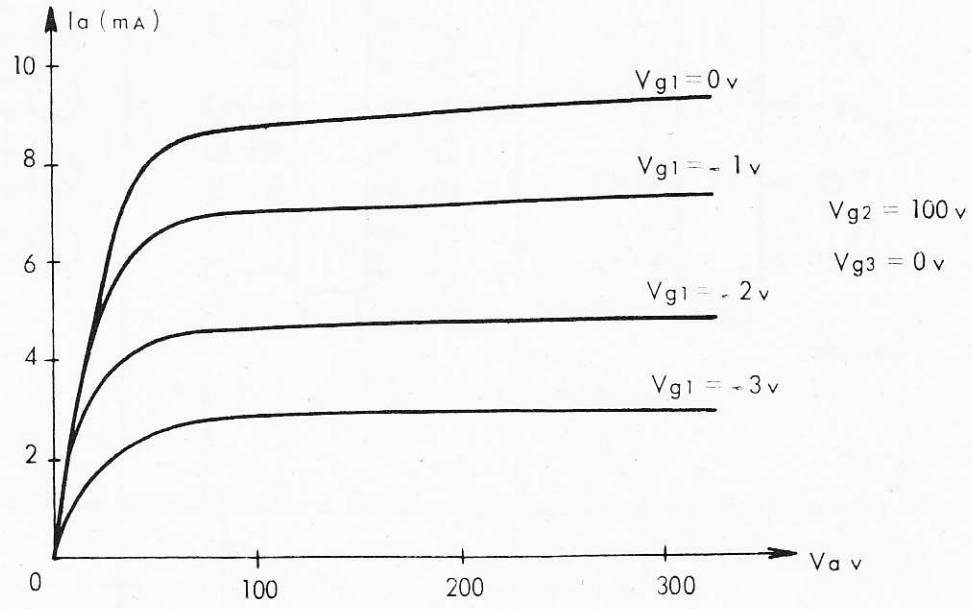
$$\mu = \rho \times S$$

S étant de même ordre de grandeur que pour la tétrode

ρ étant plus élevé que pour la tétrode

μ est plus grand que pour la tétrode.

COURBE CARACTERISTIQUE -



La pentode ne suit pas la loi d'ohm.

Au-dessus d'une certaine valeur de la tension anodique, ses variations n'ont pratiquement plus d'influence sur le courant.

Une pentode maintient le courant constant dans le circuit où elle est insérée.

241 - PENTODE A PENTE VARIABLE - INFLUENCE DE LA GRILLE DE COMMANDE.

La polarisation a pour but d'accumuler une charge négative sur la grille de commande, déterminant ainsi un champ électrique dans le sens cathode grille qui freine les électrons dans leur trajectoire cathode anode.

Le freinage sera d'autant plus intense qu'il y aura une charge négative importante sur la grille de commande.

Ce résultat peut être obtenu :

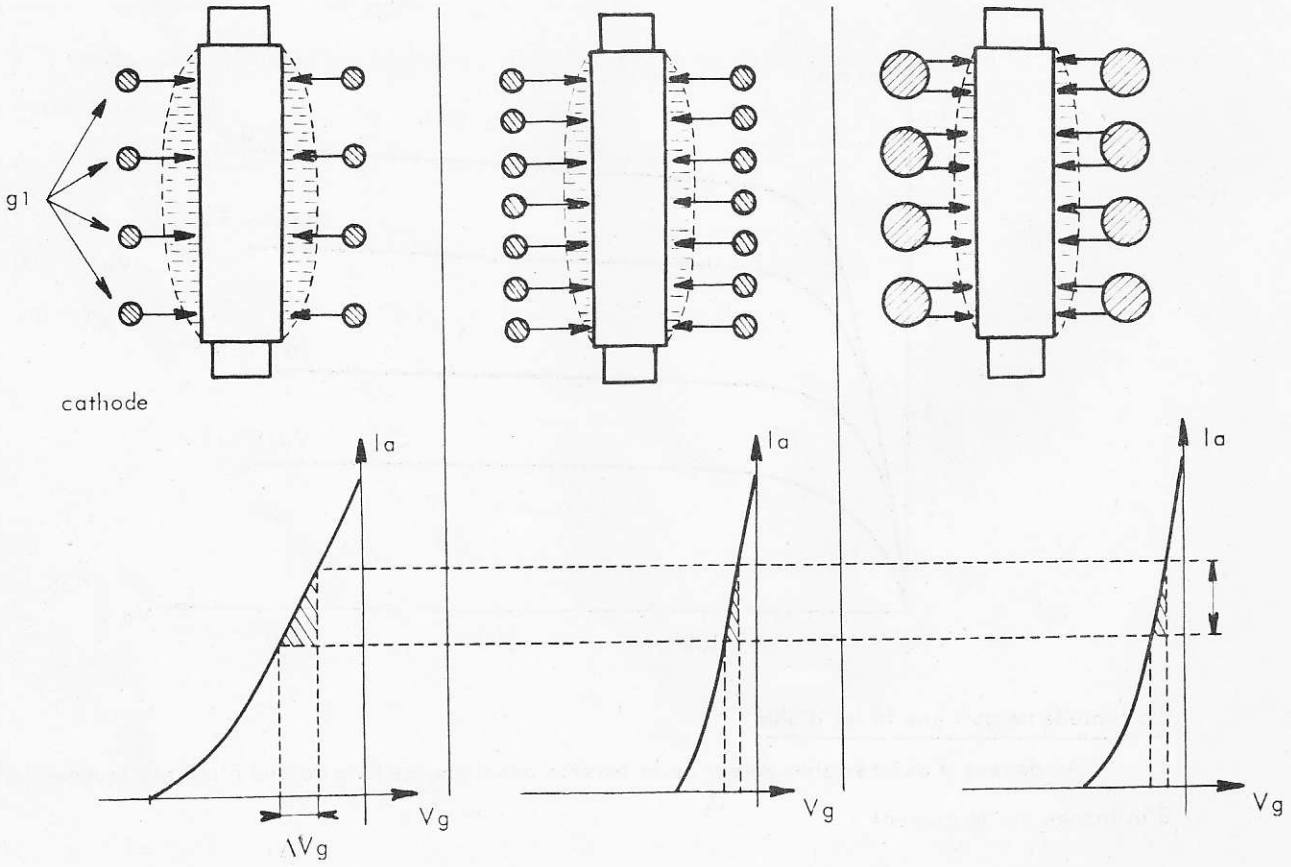
a) par une polarisation fortement négative (cut-off).

b) en augmentant la surface de la grille

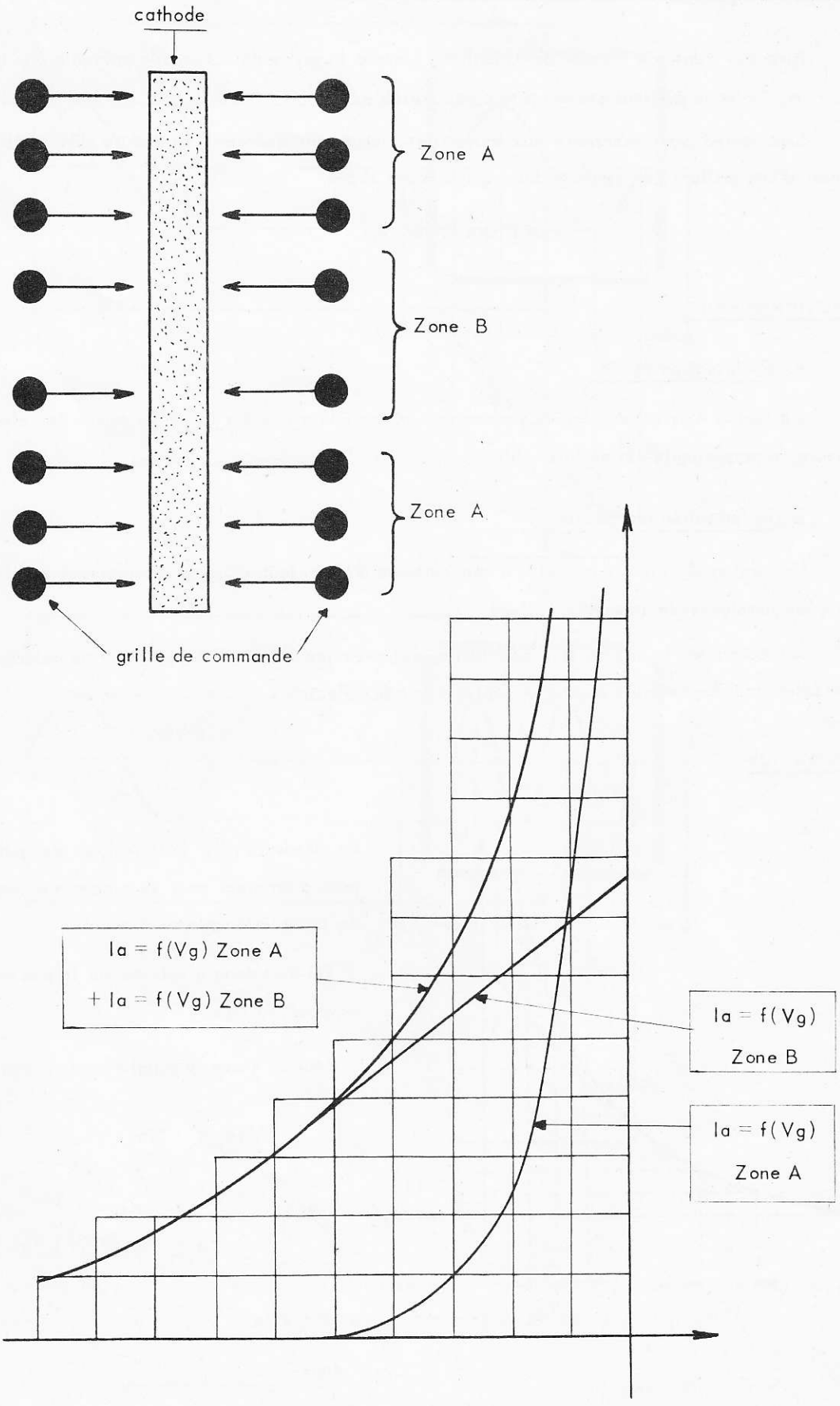
- nombre de spires plus important (pas serré).
- section du fil spirale plus grande.

Dans ce cas, le cut-off sera atteint avec une tension de polarisation plus faible.

FORCES DE REPULSION DES ELECTRONS.



$$\text{à } S' = \frac{\Delta Ia}{\Delta' Vg} < S = \frac{\Delta Ia}{\Delta V'g}$$


cathode
Zone A
Zone B
Zone A
grille de commande
Ia = f(Vg) Zone A
+ Ia = f(Vg) Zone B
Ia = f(Vg)
Zone B
Ia = f(Vg)
Zone A

CONSTITUTION DE LA PENTODE A PENTE VARIABLE

Elle est identique à celle de la pentode ; seule la grille de commande présente une géométrie différente. Sa forme particulière est dite à pas variable.

Les spires sont reserrées aux extrémités, largement espacées au centre. On combine ainsi, l'action d'une grille à pas serré et d'une grille à pas lâche.

(Voir figure ci-contre).

FONCTIONNEMENT.

a) Polarisation faible.

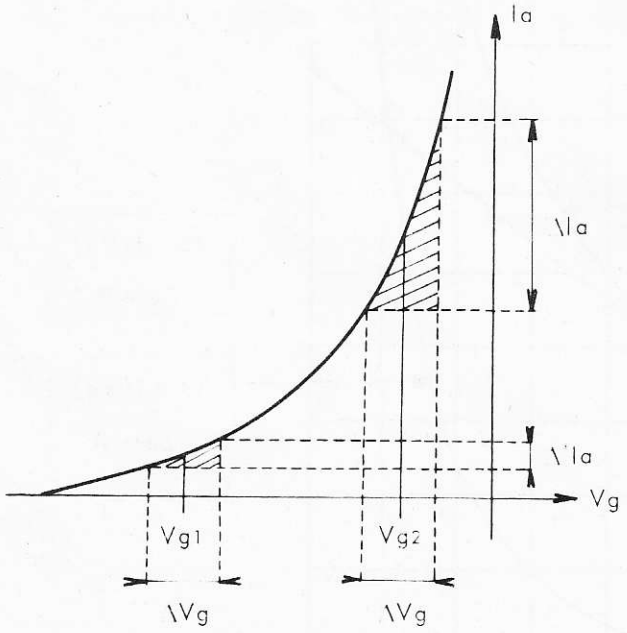
La région A à spires serrées permet une action énergique sur le déplacement des électrons et la pente correspondante est de forte valeur.

b) Polarisation croissante.

La région A interdit à partir d'une certaine valeur tout passage d'électrons et n'intervient plus pour commander le courant anodique.

Au contraire, la région B à pas lâche, entre en jeu et un plus fort recul de polarisation est nécessaire pour freiner puis arrêter le déplacement des électrons.

UTILISATION.



En modifiant la polarisation du tube, on peut s'arranger pour se placer sur une portion de caractéristique au choix.

On agit donc à volonté sur le pouvoir amplificateur du tube.

Pour un même ΔV_g, polarisation $V_{g1} > V_{g2}$

$$\Delta' I_a < \Delta I_a$$

$$S' = \frac{\Delta' I_a}{\Delta V_g} < S = \frac{\Delta I_a}{\Delta V_g}$$

$$\mu' = \rho \cdot S$$

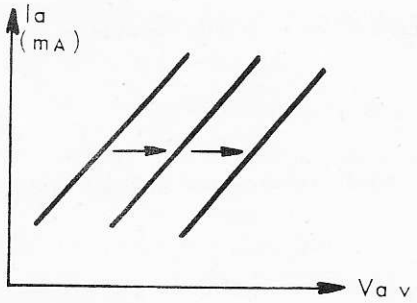
donc

$$\boxed{\mu' < \mu}$$

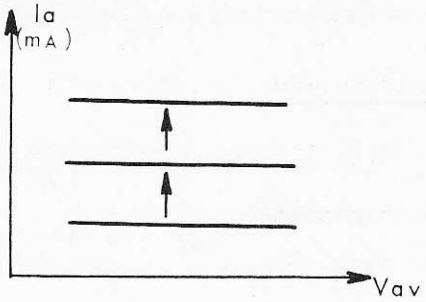
242 - COMPARAISON AVEC LA TRIODE -

Les caractéristiques $Ia = f(Vg_1)$ d'une pentode sont analogues à celles d'une triode, par contre, les caractéristiques $Ia = f(Va)$ sont différentes dans leur forme et dans leur déplacement lorsque Vg_1 varie : approximativement translation horizontale pour la triode

approximativement translation verticale pour le pentode



Triode



Pentode

243 - DIFFERENTS TYPES DE PENTODE -

a) pentode amplificatrice de tension

résistance interne très grande

pente relativement faible

facteur d'amplification assez grand

b) pentode amplificatrice de puissance

résistance interne faible

pente plus grande

facteur d'amplification relativement faible

25- LES TUBES A RAYONS CATHODIQUES

BUT :

Le tube à rayons cathodiques permet de réaliser les dispositifs électroniques appelés oscilloscopes ou oscillographes.

Ces appareils permettent de mesurer des valeurs d'une grandeur variable.

CONSTITUTION :

Une ampoule de verre en forme de tronc de cône prolongé par un cylindre est vidée de gaz très soigneusement.

Elle contient un ensemble d'électrodes et de plaques métalliques servant au lancement et au contrôle des électrons.

On distingue 4 parties principales :

1°) Le canon à électrons,

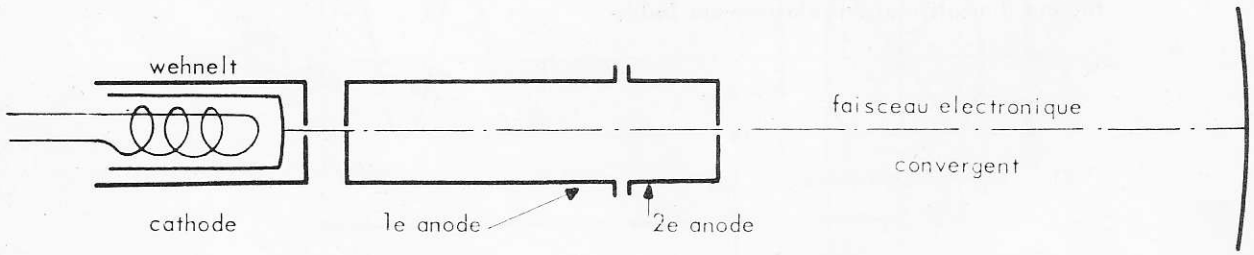
2°) Le système de déviation,

3°) L'écran fluorescent (luminescent),

4°) Le culot.

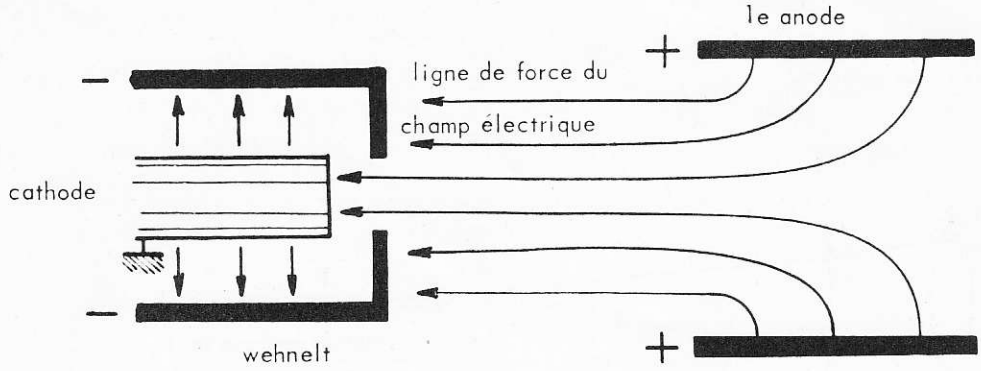
I - Le canon à électrons

Il est constitué par un système d'électrodes ayant pour objet de produire et de concentrer un faisceau électronique et d'en régler l'intensité



Le wehnelt a pour rôle

- d'éliminer les électrons s'éloignant trop de l'axe
- de faire converger le faisceau (par répulsion), il règle l'intensité du faisceau (plus il est négatif moins il laisse passer les électrons), il joue le rôle de la grille de commande d'un tube



Le dispositif de concentration :

a) par champ électrique

b) par champ magnétique.

a) Concentration par champ électrique (électrostatique)

Elle est obtenue à l'aide des deux anodes cylindriques portées à des potentiels positifs différents :

Exemple V_{a1} = 400 V. environ

V_{a2} = 2500 V. environ

- A l'intérieur de la première anode : (point M)

La force qui s'exerce sur l'électron fait converger le faisceau.

Cet effet est important : c'est dans cette région que le champ est le plus grand pour ramener les électrons dans l'axe.

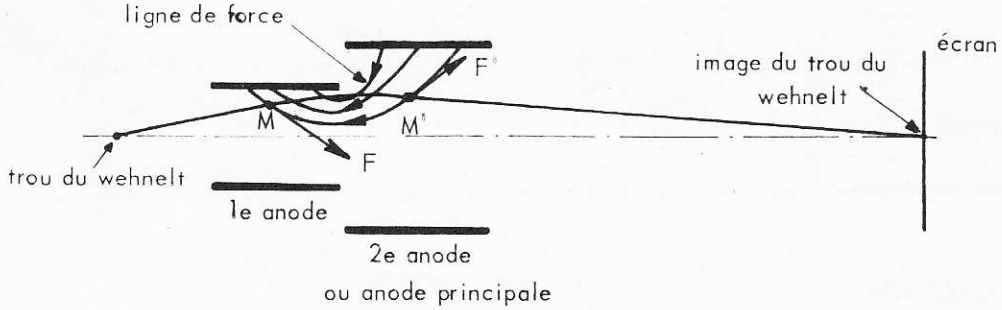
Cette force s'exerce pendant une durée relativement longue car la vitesse de l'électron est encore faible.

- A l'intérieur de la seconde anode (point M')

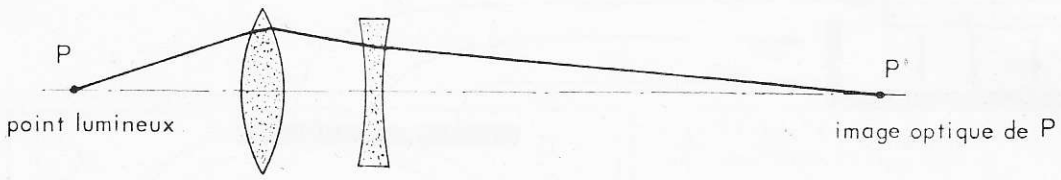
La force qui agit sur l'électron tend à l'éloigner de l'axe, mais F' composante radiale du champ est plus faible que F.

D'autre part, la vitesse de l'électron est très grande $600\sqrt{2500}$ = 30 000 Km/s donc l'électron reste moins longtemps soumis à cette force.

On améliore encore cet effet en donnant au tube constituant A_2 une longueur faible par rapport à A_1.



Analogie avec un système optique

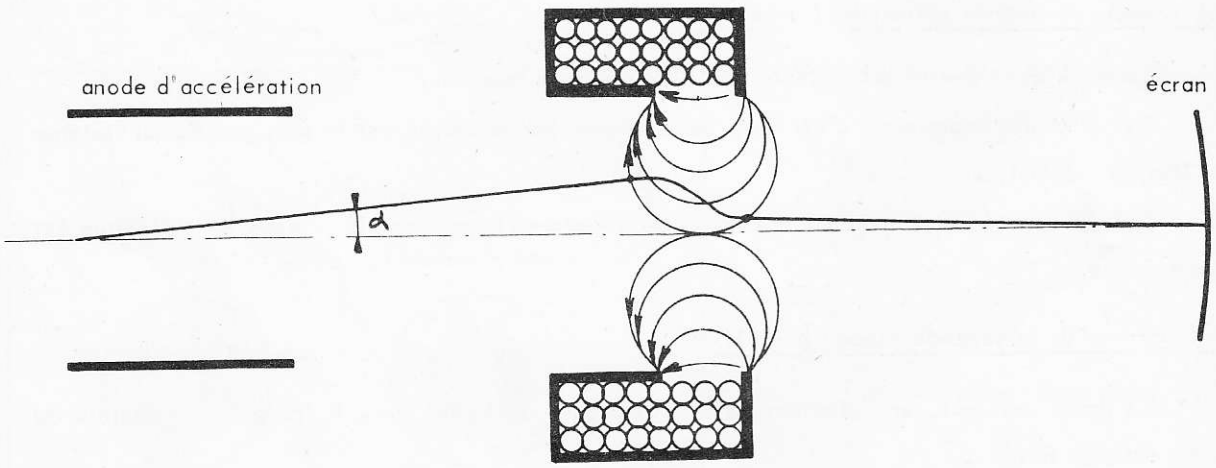


La première lentille (1e anode) fait converger le rayon lumineux.

La deuxième lentille (2e anode) fait diverger légèrement le rayon lumineux.

b) Concentration magnétique.

Le champ magnétique est créé par une bobine comportant un grand nombre de spires, lesquelles sont contenues dans un tore de fer doux qui possède un entre fer annulaire.

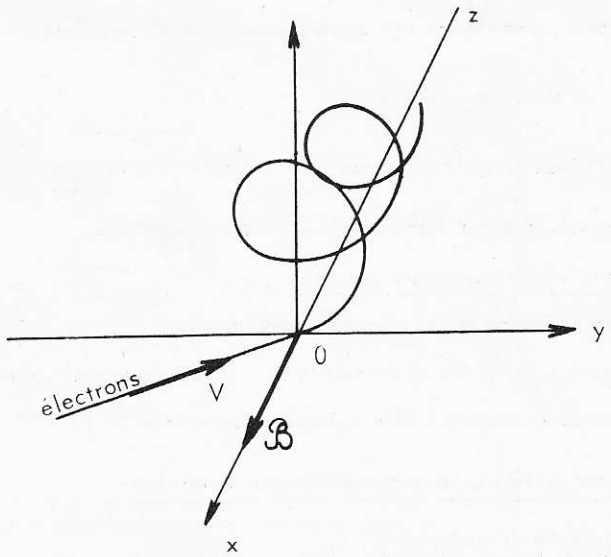


- au centre, le champ est dirigé suivant l'axe du tube, les électrons qui se déplacent sur cet axe ne sont soumis à aucune force.
- Les électrons qui sont dans des directions divergentes passent dans des régions où l'intensité et la direction du champ varient.

D'après la loi de Laplace, ils sont soumis à des forces qui les ramènent vers l'axe du tube.

Remarque :

Dans un champ magnétique circulaire , les électrons suivent une trajectoire en forme d'hélice.



Le point de concentration dépend du courant dans la bobine et de la forme du champ.

On ajuste la concentration en agissant sur l'intensité et sur la position de la bobine le long du col du tube.

La concentration peut être réalisée avec un aimant permanent en forme d'anneau.

Il est mobile autour du col du tube pour permettre le réglage.

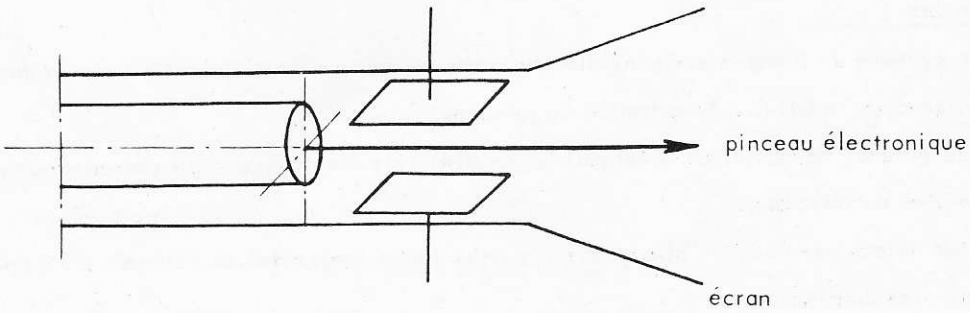
II - Dispositifs de déviation.

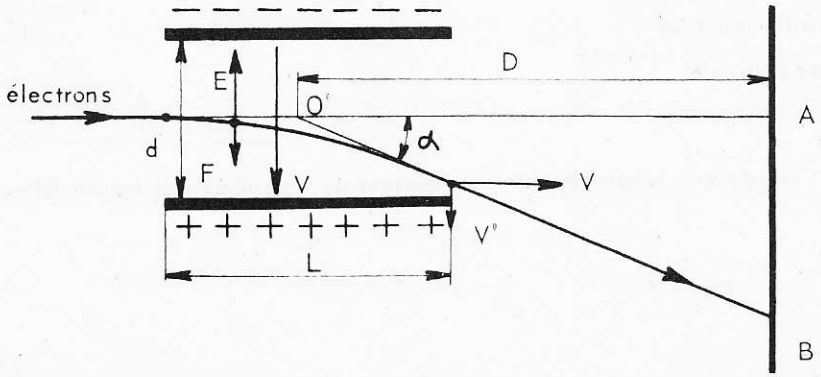
a) par champ électrique.

b) par champ magnétique.

a) déviation par champ électrique (électrostatique)

Elle est obtenue par l'application d'une tension entre deux plaques parallèles situées à l'intérieur du tube entre la dernière anode et l'écran.





Le pinceau d'électrons passe entre les deux plaques, le champ E le soumet à la force F.

$$F_N = e_C \times E_{V/m}$$

qui provoque la déviation AB dans un plan perpendiculaire aux plaques.

L'amplitude de déviation AB est fonction de plusieurs facteurs,

d'une part, elle est proportionnelle :

1°) à la distance D qui sépare l'écran du système de plaques,

2°) à la longueur L des plaques (le faisceau reste plus ou moins longtemps dans le champ),

3°) à la tension des plaques de déviation (elle détermine la valeur de E en V/ m).

d'autre part, elle est inversement proportionnelle :

1°) à l'écartement des plaques de déviation (d)

2°) à la tension continue de l'anode d'accélération (dernière anode de concentration),

L'amplitude de déviation nous est donnée par la formule :

$$\text{Déviation} \quad AB = \frac{LDV}{2dVa}$$

SENSIBILITE : $(S)_{mm/V}$

Elle exprime l'efficacité du système de déviation.

C'est la déviation AB qui est produite par une tension de 1 volt appliquée sur les plaques.

Elle s'exprime en millimètre par volt.

En fonction des caractéristiques du tube et de la tension de déflexion :

$$S = \frac{AB}{V} = \frac{LD}{2dVa}$$

Remarques :

1°) Le système de plaques est généralement porté au même potentiel continu que la dernière anode pour éviter de pertuber la concentration du faisceau,

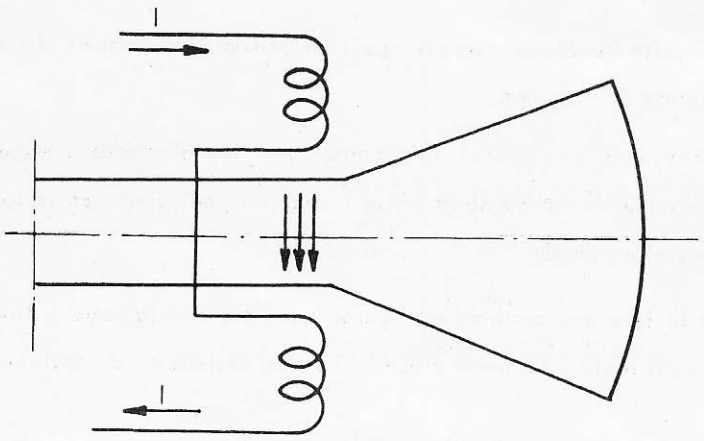
2°) Les plaques de déviation divergent légérement vers l'extrémité pour permettre des déviations plus grandes du faisceau,

3°) Pour déterminer une déviation dans les deux plans horizontal et vertical, on dispose dans le tube de paires de plaques :

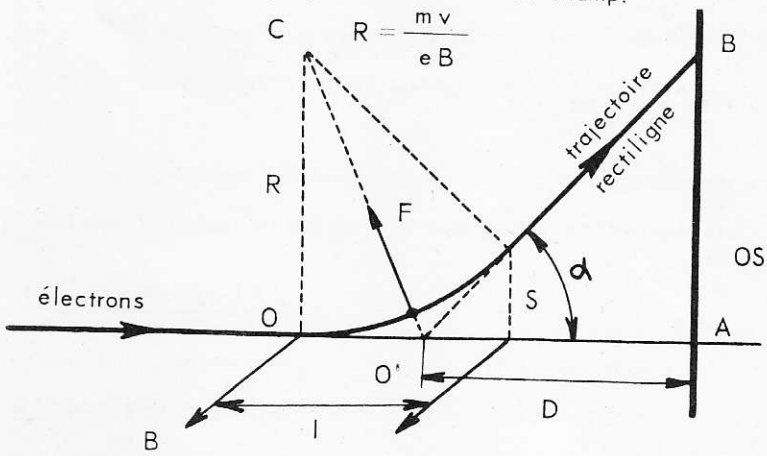
- pour la déflexion horizontale
- pour la déflexion verticale

b) déviation magnétique

Le champ est produit par deux bobines situées à l'extérieur du tube. Celui-ci est uniforme et transversal.



Le faisceau est dévié perpendiculairement au champ.



L'électron pénètre en O dans un champ magnétique uniforme et perpendiculaire à sa trajectoire il y est soumis à une force radiale et de grandeur constante :

$$F_N = B e v.$$

B : teslas
e : coulombs
v : en m/s

Pour des raisons identiques, la déviation magnétique AB dépend des mêmes facteurs que la déviation électrique :

$$AB = \frac{e}{mv} B L D$$

e : coulombs
m : kilogrammes
v : m/s
B : teslas
L : mètres
D : mètres

Sensibilité de déviation magnétique :

Elle s'exprime en millimètre par Tesla :

C'est la déviation en millimètre qui est produite par un champ d'induction égal à l'unité :

$$S = \frac{AB}{B_{(T)}} \qquad S = \frac{e}{mv} LD$$

III - L'ECRAN FLUORESCENT

En arrivant sur l'écran les électrons perdent leur énergie cinétique qui est transformée :

- en partie pour exciter la fluorescence de l'écran,
- en partie pour provoquer une émission d'électrons secondaires,
- le reste en chaleur

Nota. -la lumière est blanche, verte ou bleue suivant que l'on utilise des enduits de sulfate de zinc, de silicate de zinc ou de tungstate de cadmium,

Les électrons secondaires émis par l'écran sont captés par une électrode conique (revêtement conducteur d'aquadag : suspension aqueuse de graphite) spécialement disposée le long de la partie évasée du tube et reliée à la dernière anode,

La chaleur fournie par le faisceau bombardant l'écran peut détruire la couche fluorescente, inconvénient constaté quand le spot reste à la même place (absence de tension de déflexion).

IV - LE CULOT :

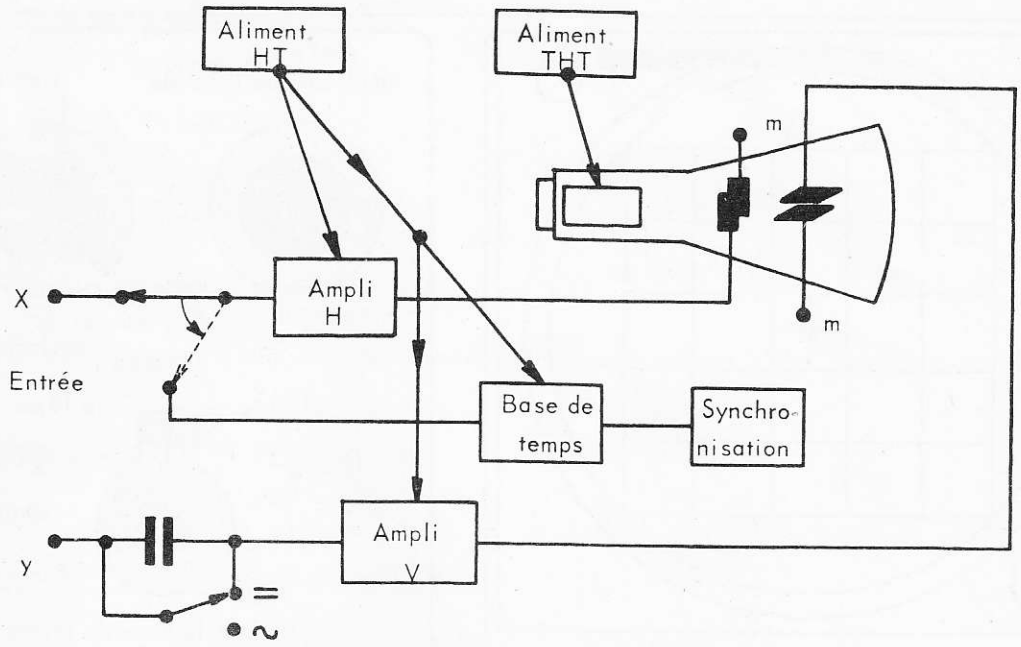
Il supporte les broches auxquelles sont réunies toutes les électrodes et plaques

251 - OSCILLOGRAPHE CATHODIQUE -

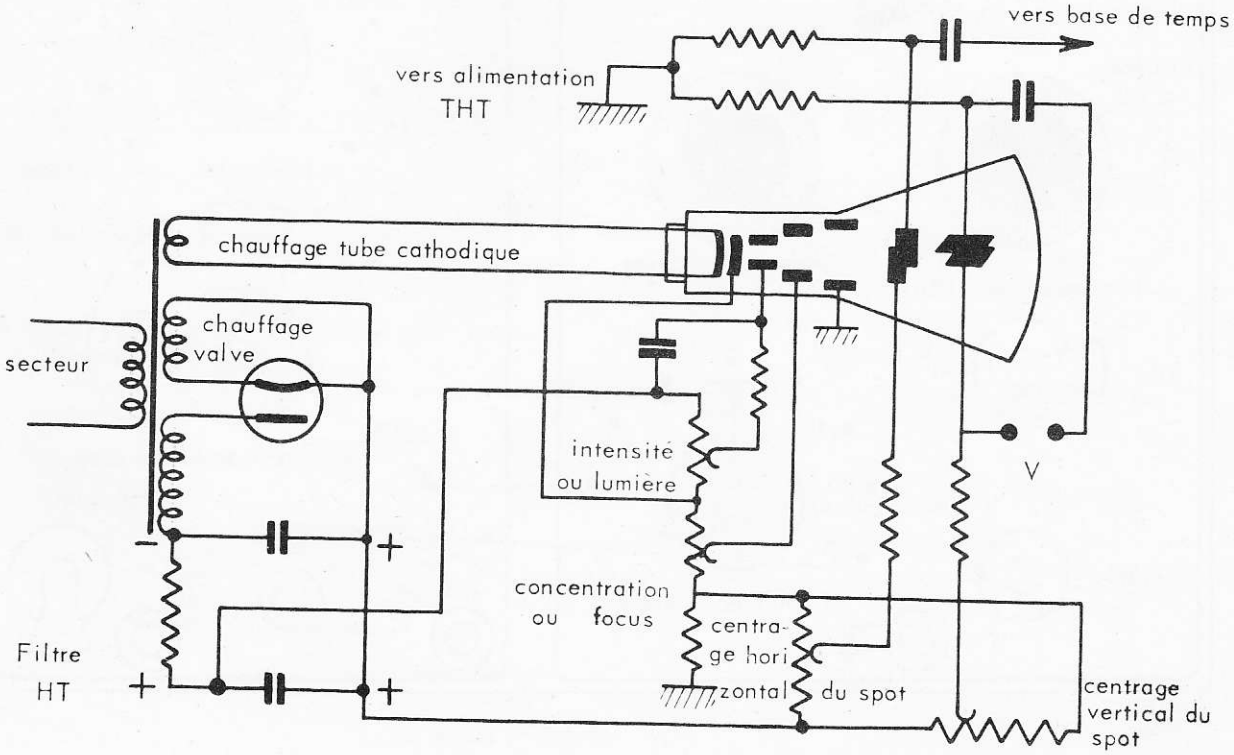
- Généralités

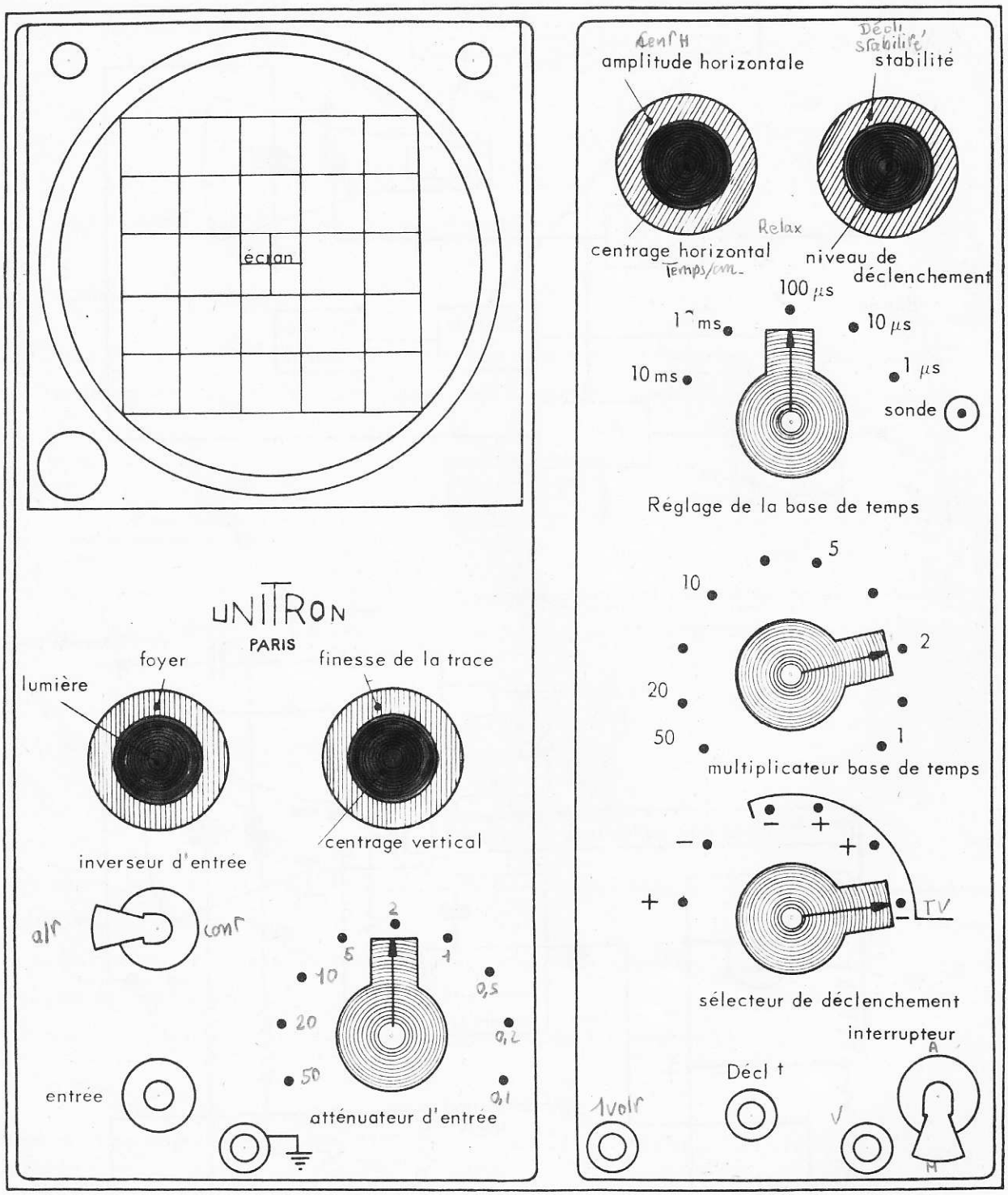
L'oscilloscope est un appareil de mesure permettant de montrer visuellement un phénomène périodique, d'en observer la forme et d'en mesurer aisément l'amplitude et la fréquence.

- Schéma fonctionnel au synoptique d'un oscillographe



- Schéma du tube et ses dispositifs de réglage




écran
UNITRON
PARIS
foyer
lumière
finesse de la trace
inverseur d'entrée
centrage vertical
entrée
atténuateur d'entrée
amplitude horizontale
stabilité
centrage horizontal
niveau de déclenchement
Relax
100 µs
10 µs
1 µs
10 ms
sonde
Réglage de la base de temps
5
10
2
20
50
1
multiplicateur base de temps
TV
sélecteur de déclenchement
interrupteur
Décl t
1volt

Un oscillographe cathodique est composé essentiellement

- d'un tube cathodique : c'est la pièce fondamentale de l'appareil
- d'un amplificateur vertical (ou amplificateur y)

  Un atténuateur d'entrée précède l'amplificateur, il a pour but de réduire à un niveau convenable la tension étudiée dans le cas ou celle-ci serait trop forte.
- d'un amplificateur horizontal (un amplificateur X)

Note - Les amplificateurs amènent le niveau du signal ou signal à étudier à un niveau suffisant pour dévier le spot du tube cathodique.

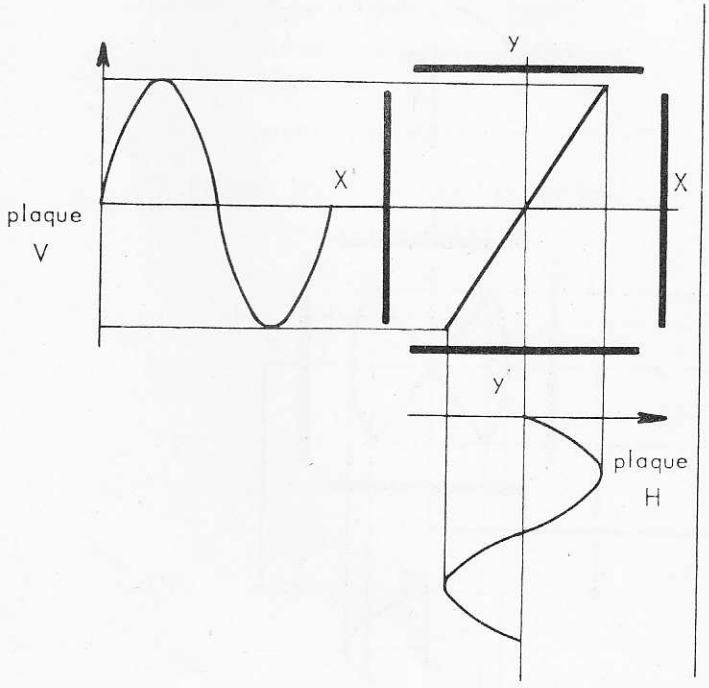
- une base de temps au générateur de balayage linéaire.

  Ce générateur délivre une tension en dents de scie, à ce générateur est associé un dispositif de synchronisation.
- un système d'alimentation, transformateur, tube redresseur, éléments de filtrage.

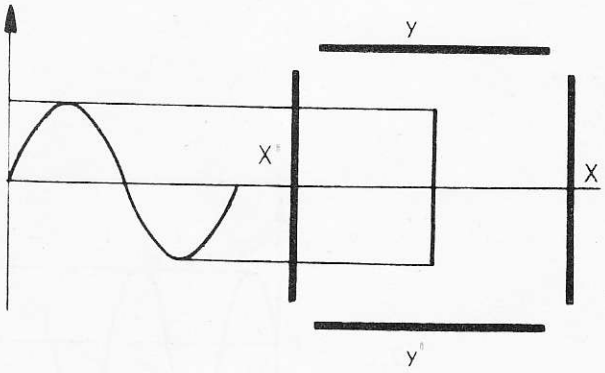
Formation de l'oscillogramme -

a) Mesures sans base de temps.

Tensions en phase φ 0

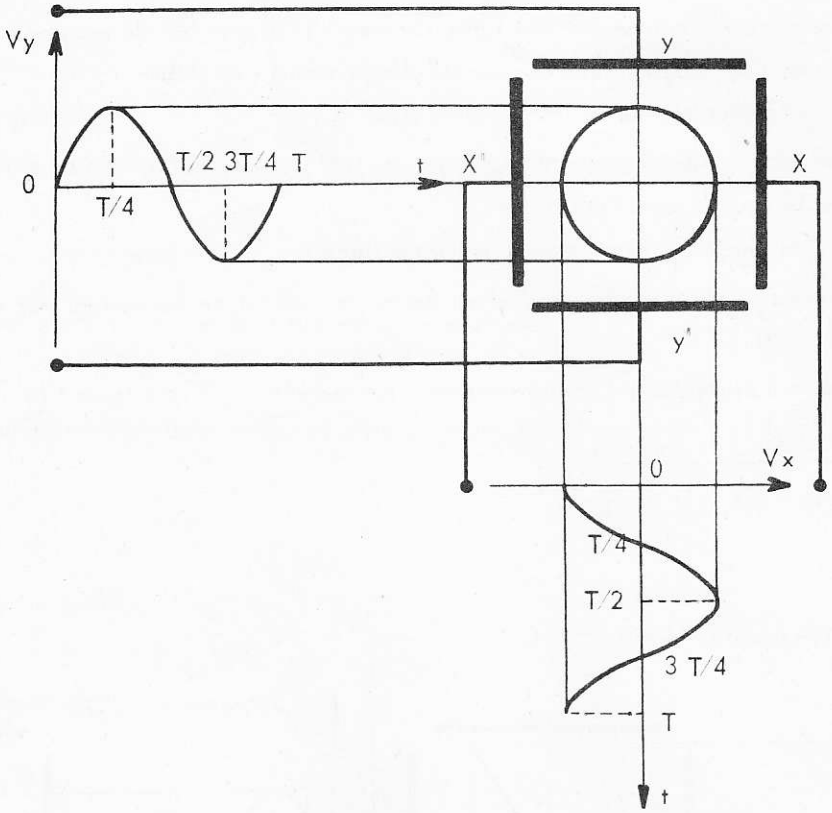


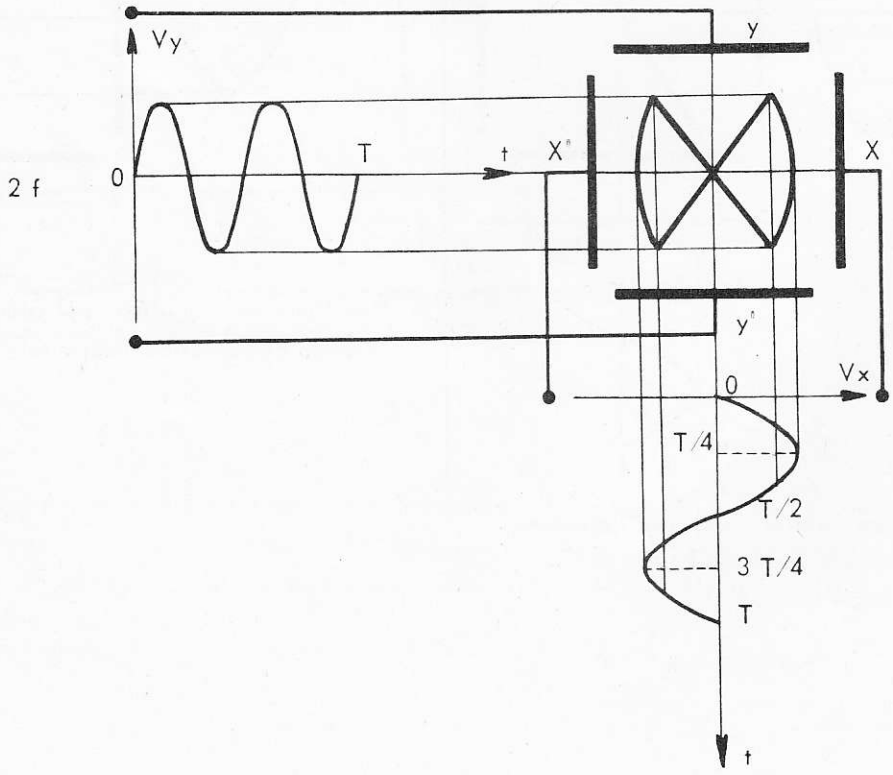
Les tensions sont légèrement différentes puisque la sensibilité des deux paires de plaques n'est pas la même.



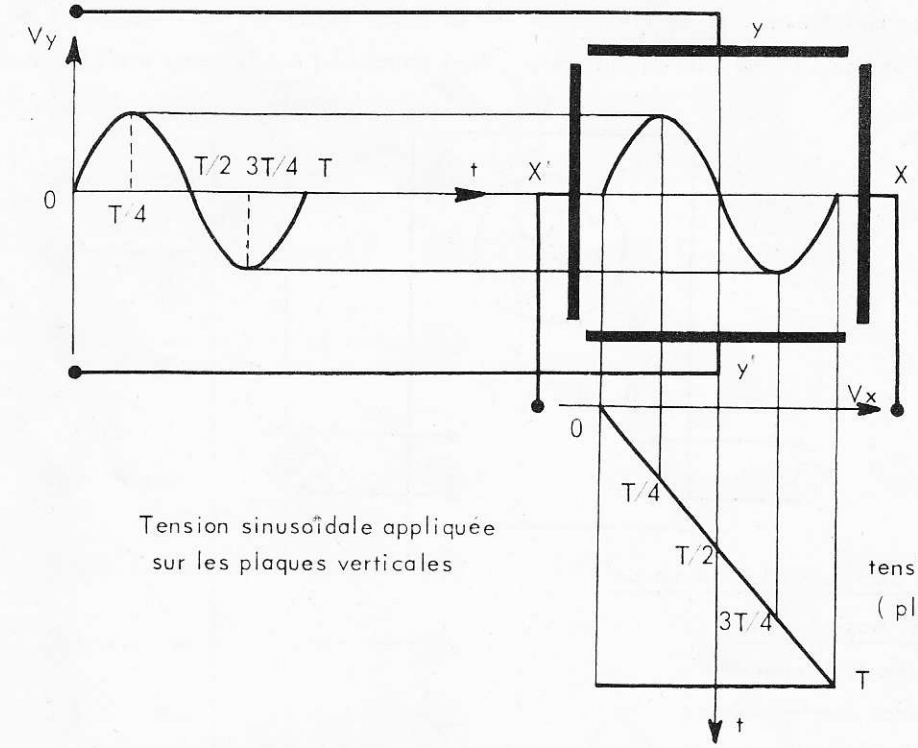
Aucune tension n'est appliquée sur les plaques de déviation horizontale.

Comparaison des fréquences -



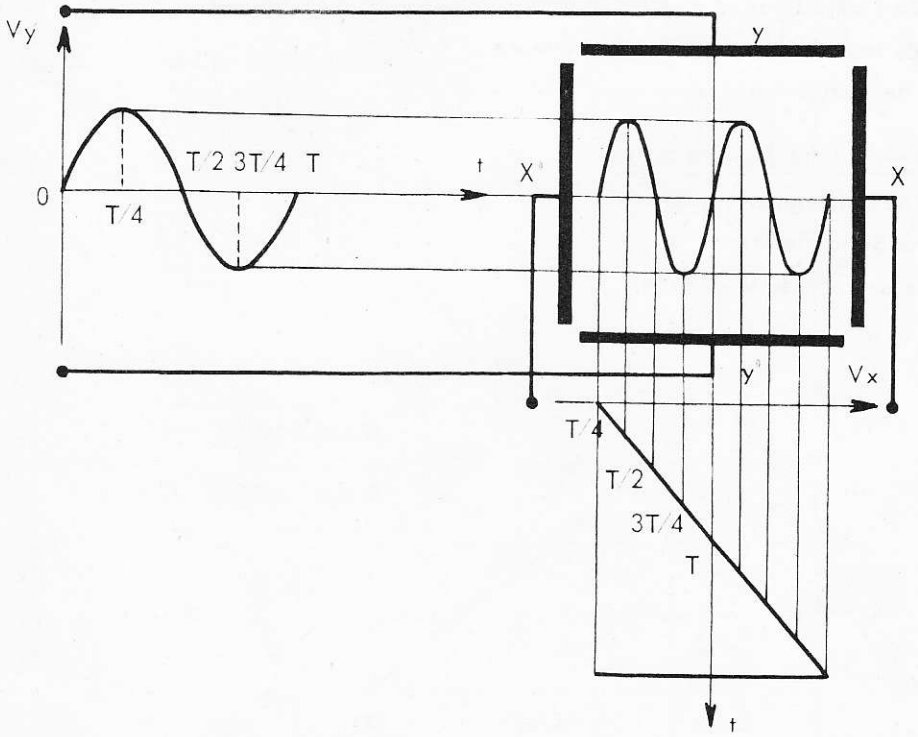


b) Mesure avec l'aide d'une base de temps



Tension sinusoïdale appliquée sur les plaques verticales

tension en dent de scie (plaques horizontales) (base de temps)



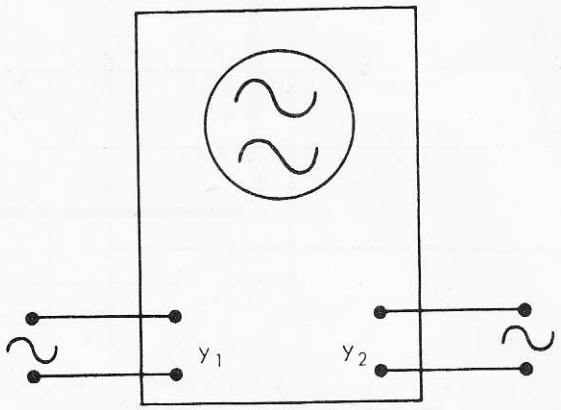
Stabilite de l'oscillogramme.

Pour obtenir un oscillogramme stable, la frequence fx du balayage doit être égale à la fréquence fy de la tension analysée, ou plus généralement en être un sous-multiple entier .

$$fx = \frac{fy}{n} \qquad n = \text{nombre entier} \geq 1$$

Oscillographe bicourbe-

Cet appareil permet d'examiner simultanément sur un même écran les oscillogrammes de 2 tensions différentes. Il utilise un tube à double faisceau (dans un même tube 2 canons à électrons indépendants.)



Applications de l'oscillographe cathodique :

1) Mesure sans base de temps :
   - mesure des déphasages
   - comparaison des fréquences
   - mesure de l'amplification d'un étage amplificateur
   - mesure du taux de modulation des émetteurs
   - défauts de modulation

2) Mesure à l'aide d'une base de temps :
   - analyse des différents signaux
   - recherche de la distorsion
   - tracé des courbes de résonance.

26 - LES TUBES A GAZ

RAPPELS THEORIQUES.

a) Energie cinétique :

L'énergie cinétique acquise par un corps de masse (m en kg) et de vitesse (v en m/s) est :

$$W_j = \frac{1}{2} m v^2.$$

b) Travail du champ électrique :

Le travail que doit fournir un champ électrique produit par une d. d. p. U pour déplacer une charge Qc vers les potentiels croissants est :

$$W_J = Qc \times Uv.$$

S'il s'agit d'un électron, le travail sera :

$$W_J = e_c \times U_v$$

Le travail s'exprime dans ce cas en électron-volt :

$$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C} \times 1 \text{ V}.$$

D'où :

$$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Joules}.$$

REMARQUES :

1°) $W_J = e_c$ Uv est le travail que doit fournir le champ électrique pour déplacer un électron vers les potentiels croissants.

Cette énergie est emmaganisée dans l'électron sous forme d'énergie cinétique due à la vitesse acquise.

2°) Un électron ne peut descendre un champ retardateur que s'il possède une énergie au moins correspondante au travail que fournit ce champ, tel que :

$$W_j = \frac{1}{2} m V^2 = e_c \times Uv.$$

c) Comportement des gaz :

Dans un gaz qui est formé d'atomes, on peut par un moyen quelconque fournir de l'énergie à un électron de l'un de ces atomes ; suivant la quantité d'énergie cédée, il pourra se produire 2 phenomènes :

1°) Excitation : L'électron passe sur une orbite plus éloignée de son noyau.

2°) Ionisation : L'électron acquiert une énergie suffisante pour quitter l'atome.

Dans les 2 cas, l'atome cherche à revenir à l'état initial, donc à récupérer un électron. Celui ci restitue alors de l'énergie sous forme de rayonnement visible (lumière) ou invisible (chaleur).

EXISTENCE DU COURANT DANS LES GAZ

a) à la pression atmosphérique sous forme d'étincelles.

On a un courant de faible durée et de faible intensité. Dans l'air, il faut au moins 30 000 volts / cm (foudre).

b) Arcs électriques dans l'Air.

(avec électrode de charge).

Courant de grande intensité lorsqu'il est amorcé sous une faible d. d. p. Les électrodes sont incandescentes. C'est la décharge par arcs.

c) Décharges luminescentes sous faible pression.

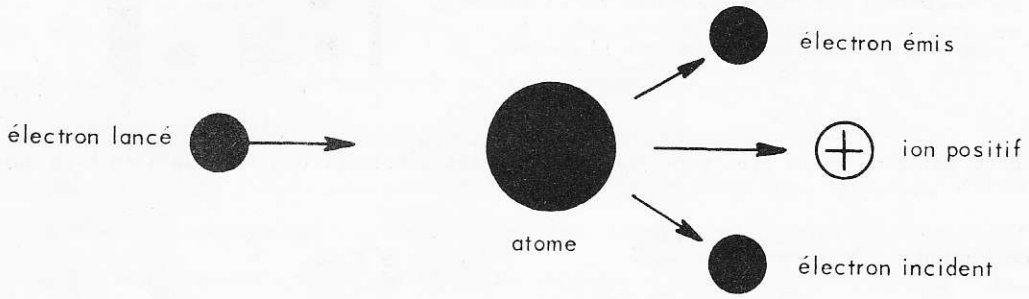
Le courant est de faible intensité ; on a une émission de lumière colorée qui va dépendre de la nature du gaz utilisé.

Dans tous les autres cas, il y a émission de lumière.

261 - IONISATION DES GAZ -

PHENOMENE D'IONISATION.

a) Ionisation par chocs :



b) Autres causes d'ionisation :

- Rayonnement (X, Ultra violets,
  (cosmiques.
- Champ HF intense.

NOTA - La lumière visible et les infra-rouges n'ionisent pas les gaz.

POTENTIEL D'IONISATION-

L'ionisation n'est possible que si l'énergie cinétique de l'électron incident est suffisante.

Si Wi est le travail nécessaire pour arracher un électron à un atome, c'est le travail d'ionisation du gaz.

On doit avoir au moins : $\frac{1}{2} mV^2 > Wi$

Pour que l'électron partant du repos ait acquis une énergie d'ionisation, il faut une d. d. p. Ui telle que :

$$Wi = eUi.$$

Ui est le potentiel d'ionisation de ce gaz.

Exemple : Le néon Ui = 21, 5 V ; donc Wi = 21, 5 eV.

Soit Wi = $1,6 . 10^{-19} \times 21,5 = 34,4 . 10^{-19}$ J.

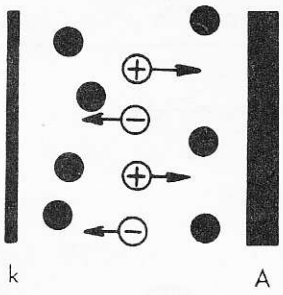
Vapeur de Hg: Ui = 10, 4 V.

NATURE DU COURANT DANS LES GAZ -

- Soient 2 électrodes (anode et cathode)

Dans un gaz le courant est la résultante :

- du courant des électrons allant vers l'anode.
- du courant des ions allant vers la cathode.



La masse des ions étant bien supérieure à celle des électrons leur vitesse sera bien moins grande.

L'accélération $\gamma_{m/s/s} = \frac{F_N}{m_{Kg}}$; $V_{m/s} = \gamma t$.

Elle est environ 600 fois plus faible.

Le courant ionique est négligeable par rapport au courant dû aux électrons.

Remarque - Un tube à gaz donnera pour une même tension d'anode un débit considérablement plus grand qu'un tube à vide de même dimension.

Ceci est dû à la suppression de la charge d'espace autour de la cathode.

INFLUENCE DE LA PRESSION : LIBRE PARCOURS MOYEN.

Dans un tube à gaz, la pression est faible, mais le nombre d'atomes est encore important.

Pour une pression de 1 mm de mercure, on a : 2×10^{19} atomes par cm^3 de gaz.

Donc, un électron traversant un gaz ne pourra pas avoir une trajectoire rectiligne. Il y aura de nombreux chocs d'où ionisation du gaz.

Le parcours moyen est la distance parcourue entre 2 chocs consécutifs. Il dépend de la pression du gaz dans l'ampoule. Celle-ci ne doit pas être trop importante, sinon les électrons n'auraient pas une énergie suffisante pour ioniser les atomes. Inversement si la pression est trop faible les électrons risquent de passer de la cathode à l'anode sans produire d'ions.

Remarque - L'ionisation est facilitée par le choix des gaz employés : gaz rares et vapeurs métalliques, (potentiel d'ionisation faible).

CONSTANTE DE TEMPS A L'IONISATION ET A LA DESIONISATION -

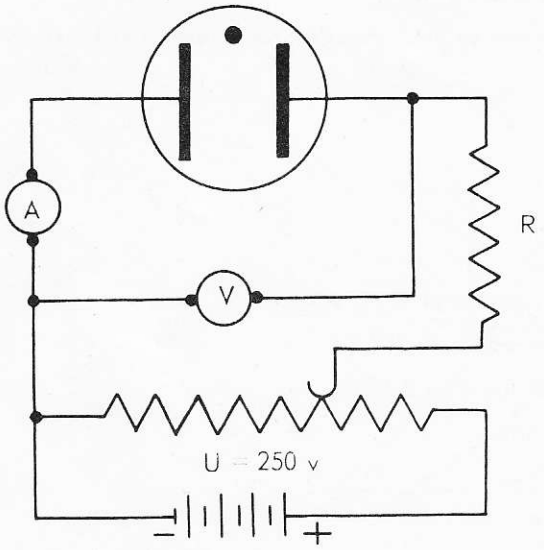
Ionisation : très rapide.

Désionisation : lente, les ions doivent arriver à la cathode pour récupérer des électrons de remplacement. Ceux-ci se déplacent lentement.

Conséquence : L'utilisation des tubes à gaz se limite aux faibles fréquences.

262 DIFFERENTS TYPES DE DECHARGE
(Tube à cathode froide)

EXPERIENCE :



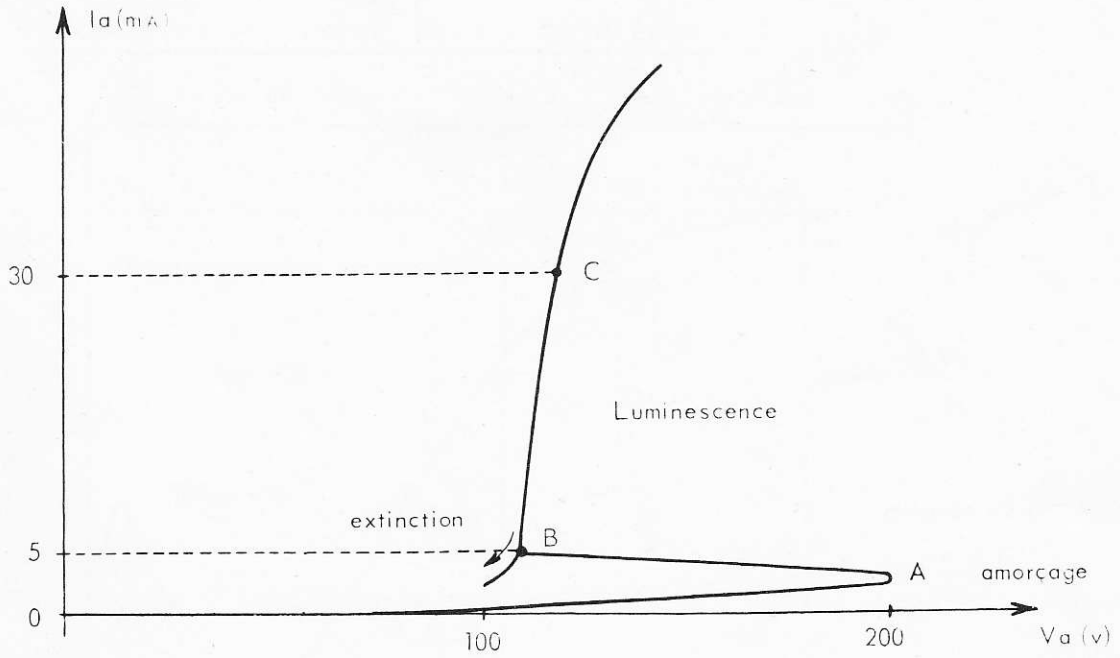
Le tube utilisé est un tube à cathode froide.

Elle peut être :
- solide (tungstène molybdène) ;
- liquide (mercure).

Quelquefois, cathode et anode ont même constitution et de ce fait, peuvent être utilisées dans les deux sens quels que soient les potentiels appliqués à ces électrodes.

Après avoir été vidée soigneusement, l'ampoule est remplie d'un gaz (néon ou argon) sous faible pression.

CARACTERISTIQUE COURANT TENSION



MECANISME D'AMORCAGE

La cathode n'émet pas d'électrons puisqu'elle n'est pas chauffée. Cependant dans un ga gaz quelconque il y a toujours des atomes ionisés.

Il existe donc un très faible courant dans le tube (O A).

Pour une tension de 200 (V) , trois phénomènes se produisent instantanément et brusquement :

- Le tube s'illumine
- Le courant anodique croît
- La tension anodique diminue

Va = 200 V est la tension d'amorçage.

Nota : La tension d'amorçage est bien supérieure au potentiel d'ionisation.

Zone (B C) - Décharge luminescente

Le tube émet une lumière dont la couleur est fonction du gaz

Le courant varie, mais la tension est constante

Avec le potentiomètre diminuons la tension

- Le courant diminue. Le tube s'éteint pour 100 v

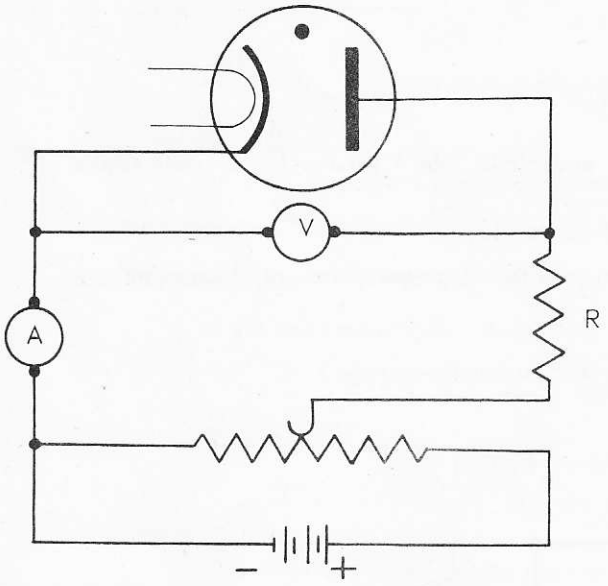
C'est la tension de désamorçage.

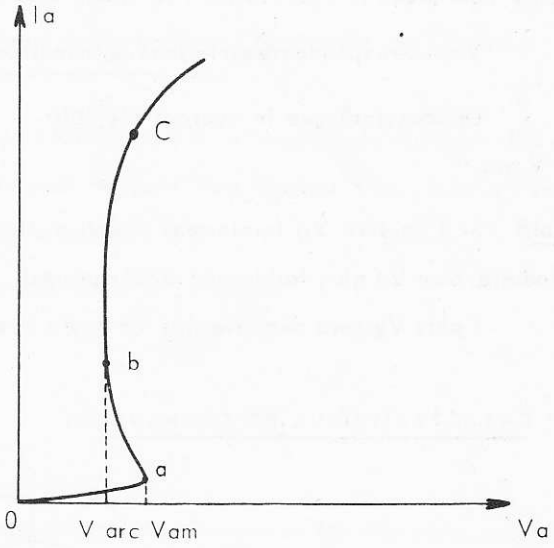
263 - PHANOTRONS - (Tubes à cathode chaude) -

Ce sont des diodes à gaz.

Elles ont l'aspect des diodes ordinaires, dans lesquelles on aurait fait le vide, poussé puis introduit un gaz sous faible pression. (0, 05 mm de mercure).

CARACTERISTIQUE COURANT TENSION -





- si Va est faible le fonctionnement est celui d une diode normale
- si Va croît à la tension d'amorçage le tube s'illumine, le courant augmente rapidement Il est limité par la résistance R

La charge d'espace est neutralisée par les ions positifs, ce qui permet un courant plus important La résistance interne d'un tel tube est faible

- si on abaisse Va au dessous de V arc, le gaz se désionise

Dans ces tubes il existe un délai :

- d'ionisation 10^{-6} à 10^{-7} secondes
- désionisation 10^{-3} à 10^{-5} secondes

Nota : Pour utiliser ces tubes, il ne faut pas dépasser le courant maximum (point C)
La température de la cathode doit être normale avant l'application de la H.T

264 - LES THYRATRONS -

Le thyratron est aussi appelé triode à gaz.

C'est un phanotron comportant une grille de commande.

Action de la grille.

- Si Vg est très négative, blocage des électrons dans l'espace cathode grille de commande.

- Si Vg est augmentée, les électrons franchissent la grille à la tension critique ($V_{m/s}$ suffisante pour produire l'ionisation , le tube s'amorce)'

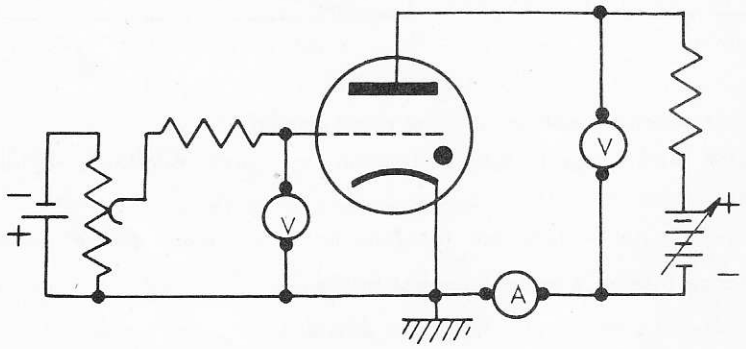
Va correspondante est la tension anodique critique.

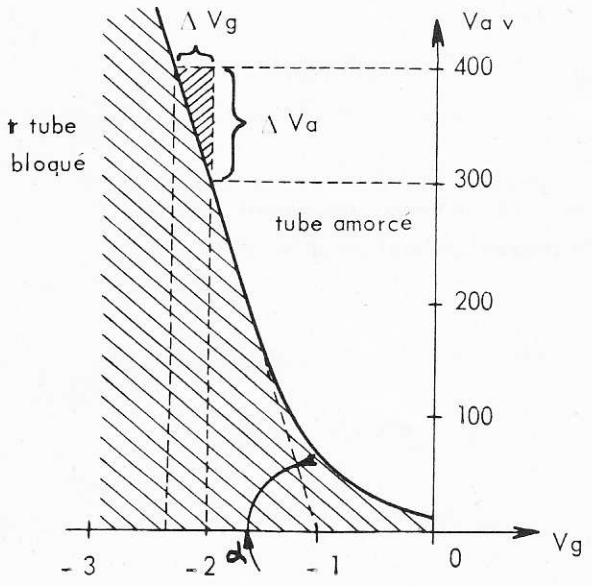
On constate que le courant s'établit - une lueur envahit le tube - La tension d'anode tombe à V arc.

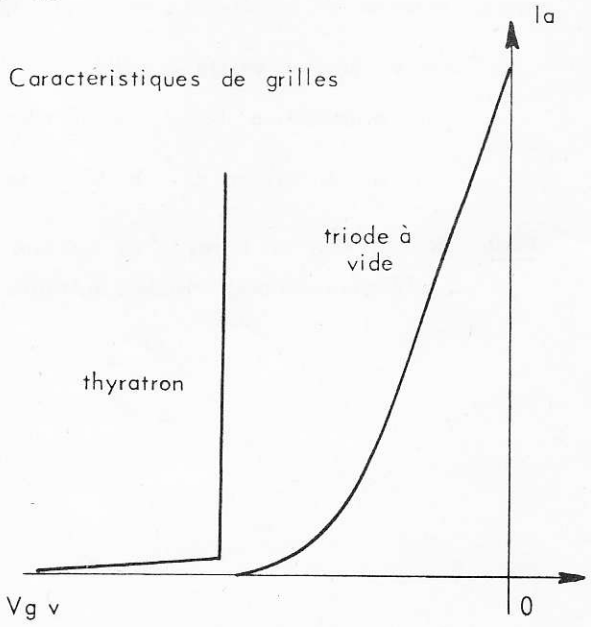
Nota : Si l'on fixe Vg faiblement négative et que l'on augmente Va progressivement, l'amorçage se produira pour Va plus faible que précèdemment.

(plus Vg sera négative plus Va devra être positive pour obtenir l'amorçage).

CARACTERISTIQUE DE COMMANDE - Va = f (Vg).







Certains thyratrons à vapeur de mercure ont plusieurs caractéristiques suivant les températures de fonctionnement.

- Avant amorçage, la grille joue le même rôle que dans une triode à vide.

- Après amorçage, le gaz est ionisé, la grille négative est entourée d'une gaine d'ions positifs qui neutralisent son action.

Pour arrêter le fonctionnement du tube, il faut annuler Va pendant un temps supérieur au temps de désionisation du tube .

Facteur de commande.

Le facteur de commande du tube est le rapport :

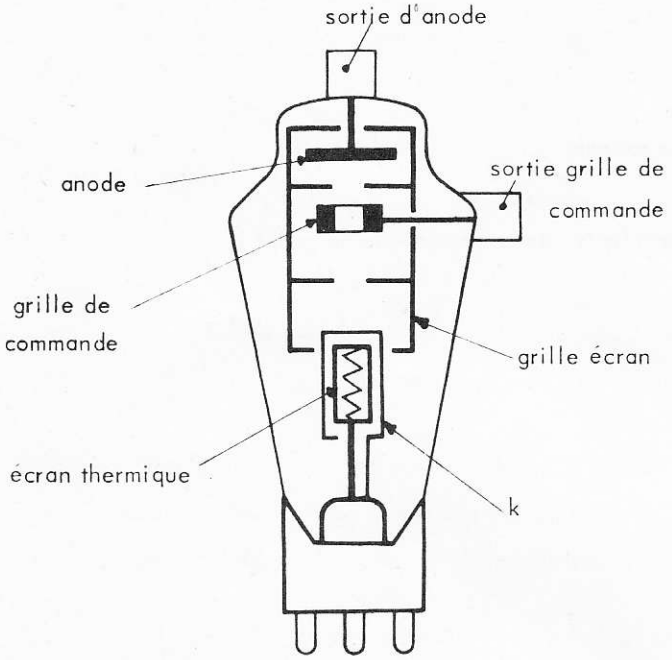
$$\frac{\text{Variation de Va}}{\text{Variation de Vg}}$$ (correspondante ; tension critique de grille).

On a : $k = \frac{\Delta Va}{\Delta Vg} = tg \propto$

THYRATRON TETRODE

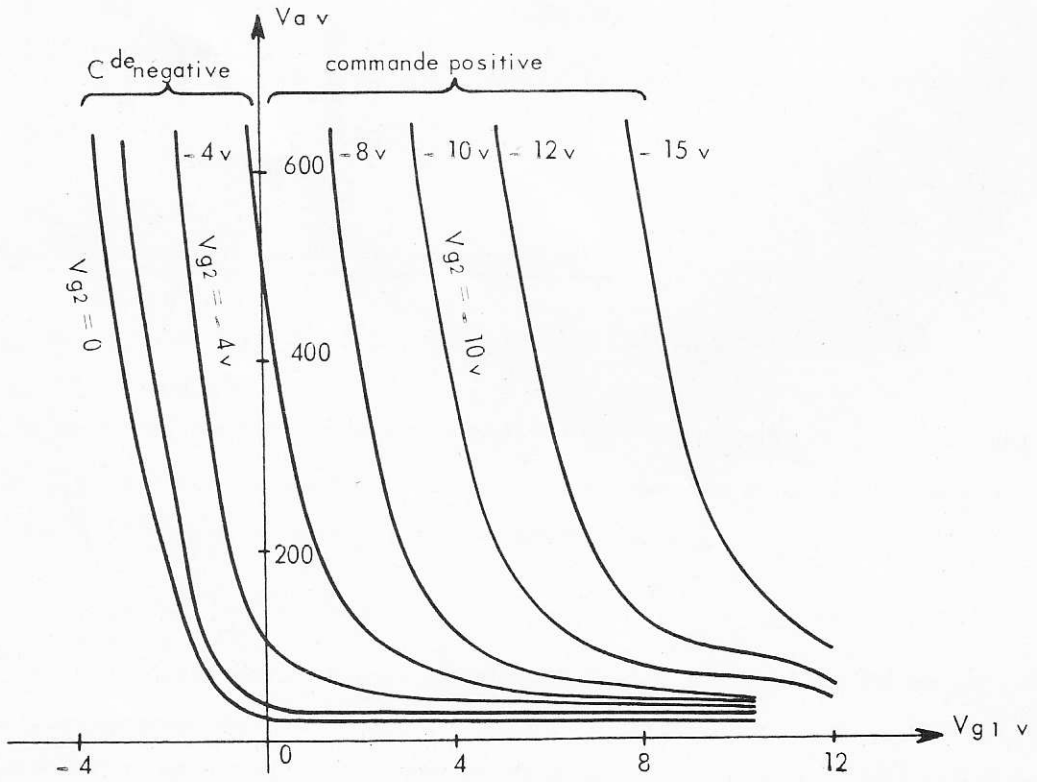
L'adjonction d'une quatrième électrode permet par action sur sa tension par rapport à la cathode de faire varier le rapport de commande dans de larges limites.

Ceci présente un intérêt considérable et dans certains cas on pourra déclencher l'amorçage du tube que pour une tension grille de commande positive.



Effets de la grille écran :

- La grille écran réduit le courant de la grille de commande.
- Elle permet de déplacer à volonté la caractéristique de la grille de commande.



- AVANTAGES -

- Très faible résistance $R \quad \frac{Vv}{Ia} \quad \frac{1}{tg\ \alpha}$

- Très faible chute de tension interne (tension arc) (8 à 15 v)

- Possibilité de laisser passer un courant important et de contrôler des puissances élevées

Un thyratron de la taille d'un tube normal peut contrôler 2 KW Il en est qui peuvent être utilisés pour des puissances d'une centaine de KW

- INCONVENIENTS -

- Temps de désionisation important (ceci va limiter le fonctionnement aux fréquences élevées)

Exemple soit un thyratron à vapeur de mercure ayant un temps de désionisation de 125 μS Le courant ne pourra s'annuler pendant l'alternance négative d'un courant alternatif que si :

$$t < \frac{T}{2} \quad \text{d où} \quad T > 2t$$

$$\text{soit} \quad \frac{1}{f} > 2t \qquad f < \frac{1}{2t}$$

$$f < \frac{1}{2 \quad 125\ 10^{-6}}$$

$$f < \frac{10^{-6}}{250} \qquad 4000 \text{ HZ}$$

Nota Les thyratrons utilisés pour certaines applications doivent avoir un temps de desionisation beaucoup plus court L'atmosphère du tube est constitue par de l'hydrogène à la pression de 0,1mm de mercure

L'ion d'hydrogène étant très léger, se déplace plus vite Sa combinaison s'effectue plus rapidement Ces tubes peuvent fonctionner jusqu'à des frequences de 100 K Hz

Cependant l'emploi de l'hydrogène presente des inconvénients car le gaz disparait peu à peu, il est absorbé par le métal

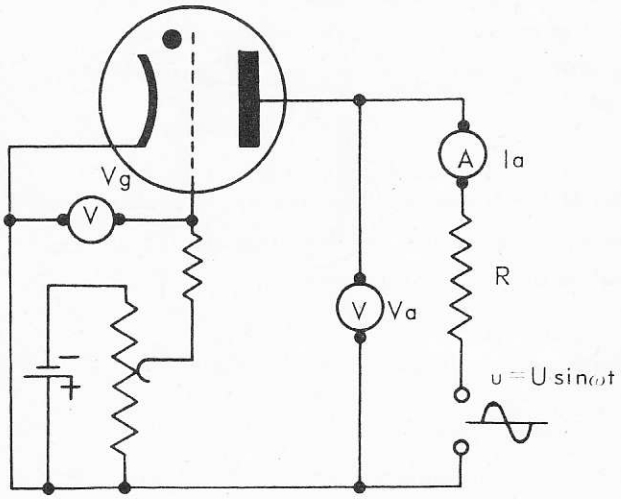
Certains tubes à hydrogène contiennent un réservoir qui maintient la pression constante

- EMPLOI DES TUBES A GAZ -

- Redressement des courants alternatifs
- Commutation de certains circuits
- Commande de courants de forte puissance
- Base de temps d'oscilloscopes

265 - FONCTIONNEMENT DES THYRATRONS EN ALTERNATIF -

1) - Montage et principe de fonctionnement



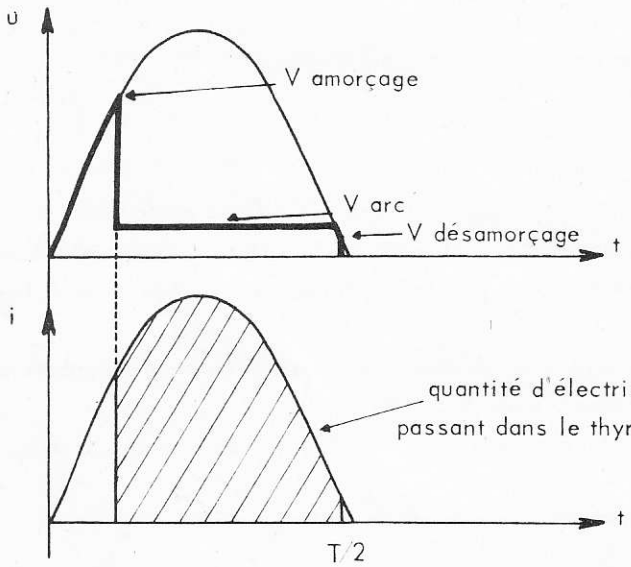
La tension grille est fixé (par ex:-2V). Appliquons à l'anode une tension $u = U \omega t$.

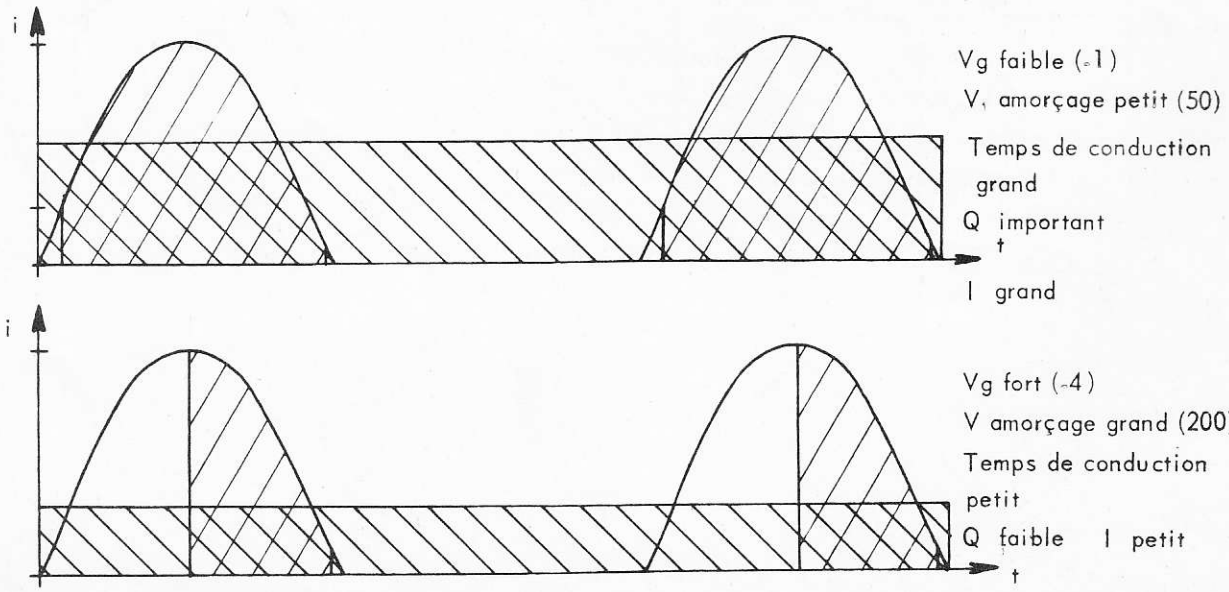
Lorsque la tension u atteint la tension d'amorçage, le thyratron s'amorce, Va tombe à la tension d'arc.

Tant que la tension u est supérieure à la tension de désamorçage le thyratron conduit. A l'alternance négative le thyratron est bloqué.

Par contre à chaque alternance positive le thyratron conduit, donc laisse passer une certaine quantité d'électricité.

En agissant sur la tension de la grille on modifie la tension d'amorçage, donc le temps de conduction, et par suite la quantité d'électricité qui traverse le circuit.





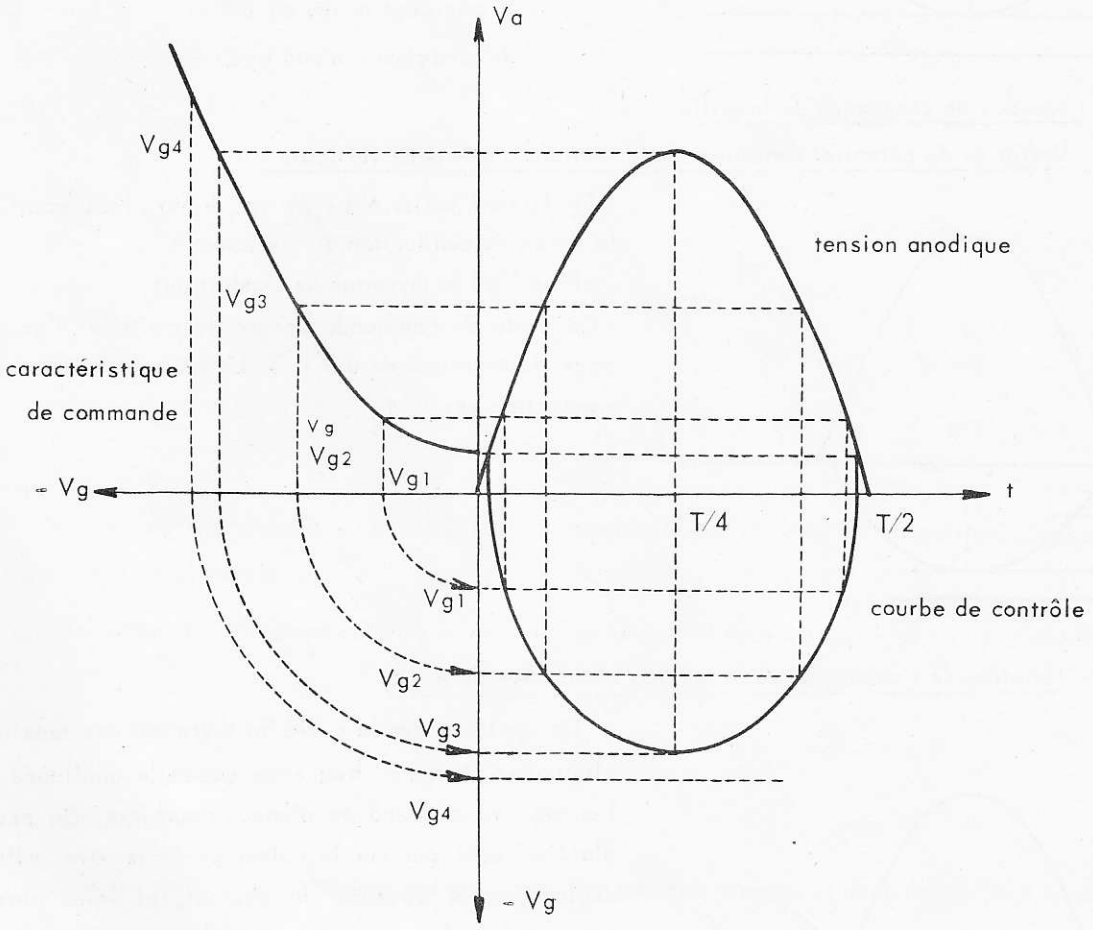
2) - Courbe de contrôle de grille

1° Définition :

La courbe de contrôle est la courbe représentant les variations de la tension critique de grille en fonction du temps.

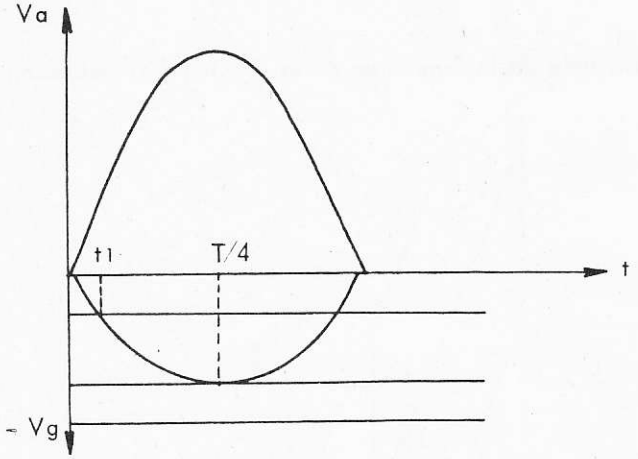
2° Construction :

Elle se construit graphiquement à l'aide de la sinusoïde de la tension d'alimentation, et de la caractéristique de commande.



- La courbe de contrôle n'est pas unique pour un thyratron donné, elle dépend de la fréquence et de la tension anodique.

- Un thyratron s'amorce à l'instant ou la tension anodique étant positive, la courbe (ou la droite) représentant la tension grille coupe la courbe de contrôle.



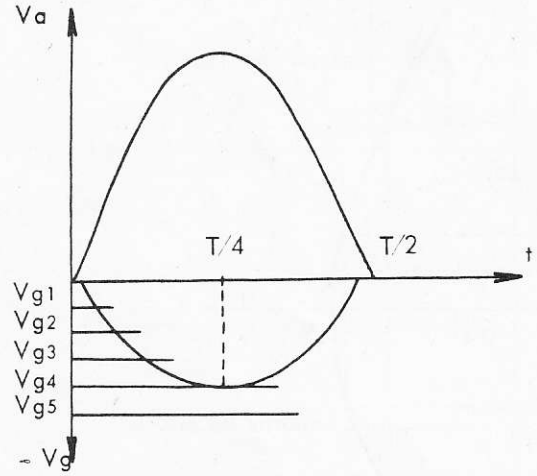
L'amorçage a lieu en t_1

L'amorçage a lieu en T/4

L'amorçage n'a pas lieu

c) - Procedes de commande de la grille

- Variation du potentiel continu de polarisation (commande verticale)

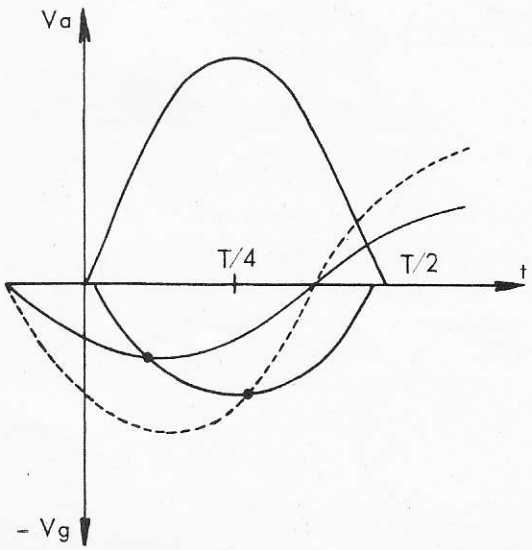


- En faisant varier Vg (de Vg_1 à Vg_4) on modifie le temps de conduction du thyratron.

Pour Vg5 le thyratron ne conduit pas.

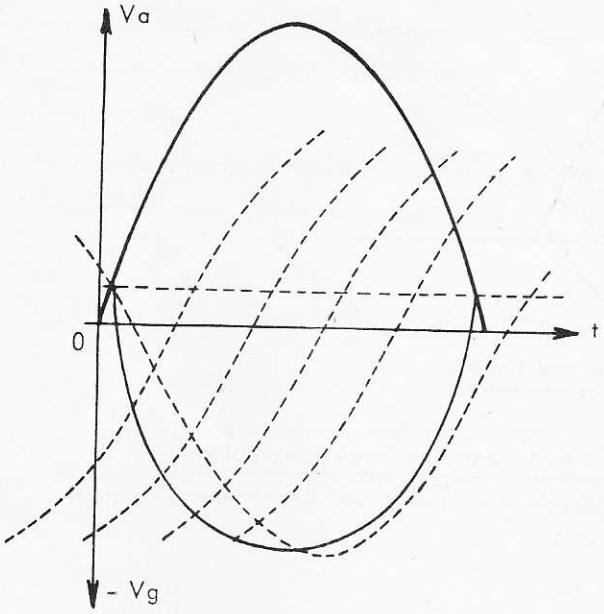
- Ce mode de commande permet de contrôler l'amorçage du thyratron de 0 à T/4. Le temps minimum de conduction est T/4.

- Variation de l'amplitude de la tension alternative de grille



On applique sur la grille du thyratron une tension alternative de même fréquence que celle appliquée à l'anode, mais déphasée d'une valeur fixe. On peut alors en agissant sur la valeur de la tension grille déclencher le passage du courant, et faire ainsi conduire le thyratron pour des temps inférieurs à T/4.

- Variation de la phase de la tension alternative de grille (commande horizontale)



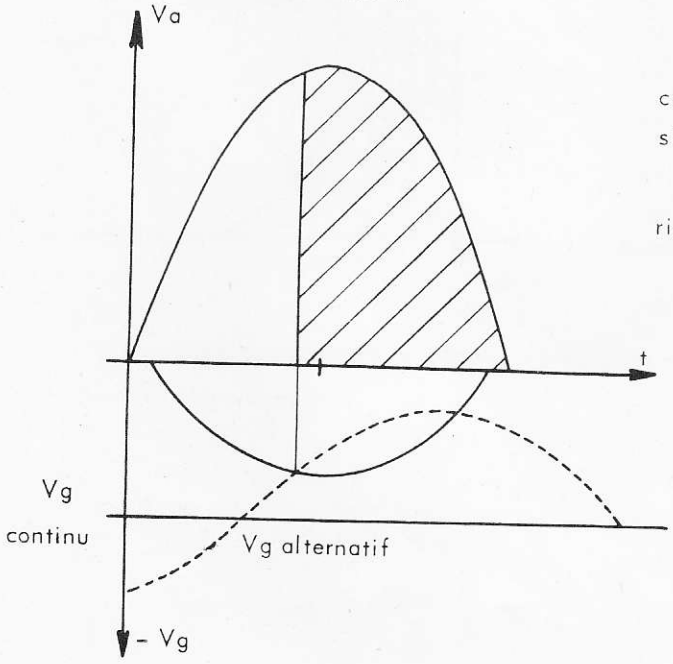
La tension alternative de grille est de même fréquence que la tension anodique et d'amplitude convenable.

On fait varier uniquement la phase de la tension grille par rapport à la tension anodique.

On peut ainsi déclencher le passage du courant à un instant quelconque entre 0 et $\frac{T}{2}$

Il ne peut pas y avoir amorçage s'il y a opposition de phase.

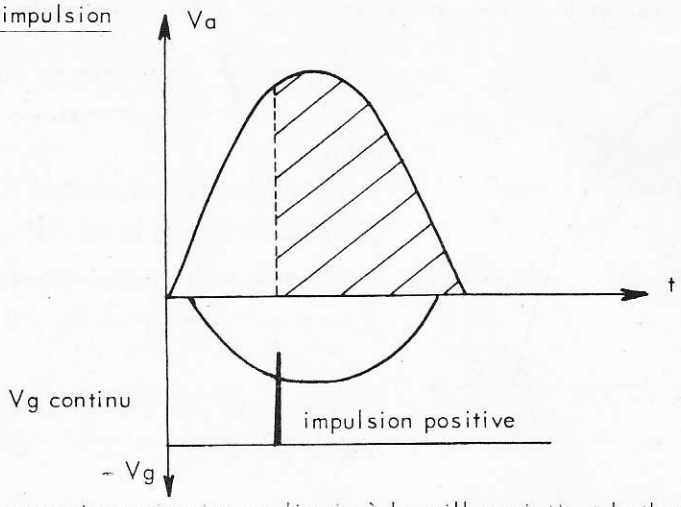
- Superposition d'une tension alternative sur une tension de polarisation continue de la grille (commande mixte).



On applique à la grille du thyratron une tension continue négative de valeur réglable, et une tension alternative dont on peut faire varier la phase.

Cette commande très souple permet de faire varier le temps de conducteurs du thyratron de 0 à T/2.

- Commande par impulsion



- Une polarisation continue négative appliquée à la grille maintient le thyratron bloqué.

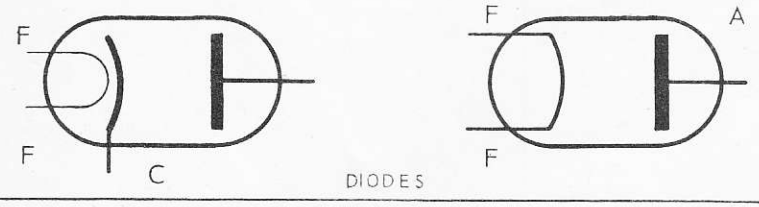
On superpose des impulsions positives d'amplitude convenable qui permettent d'amorcer le thyratron à l'instant désiré.

Remarque :

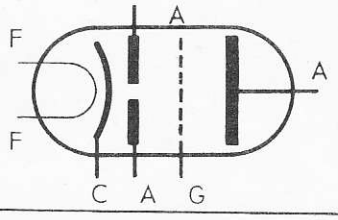
Dans tous ces procédés, si l'on veut un instant d'amorçage bien défini, il faudra un point d'intersection des courbes bien déterminé (intersection des courbes la plus perpendiculaire possible).

27 - TUBES FAIBLES ET PETITE PUISSANCE

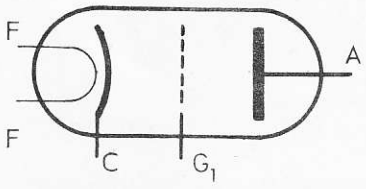
Quelques varietés de fonctions des tubes

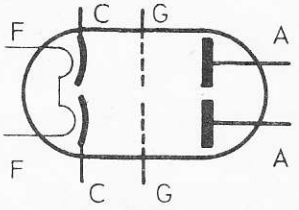


DIODES

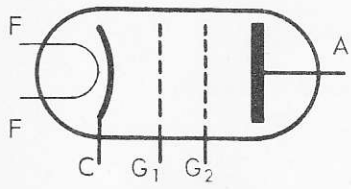


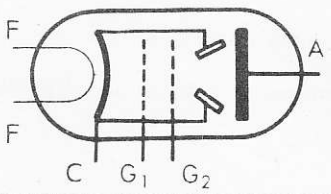
Double diode
Triode

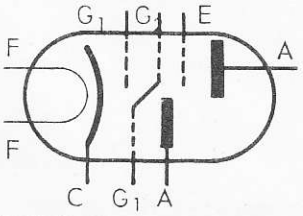




Double triode

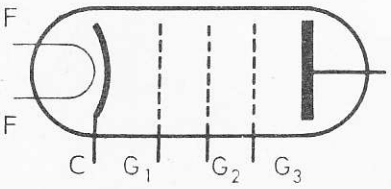


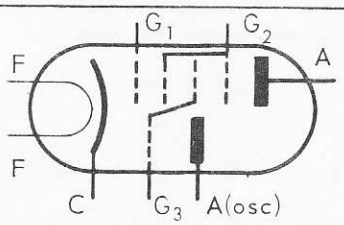




Triode
Pentode

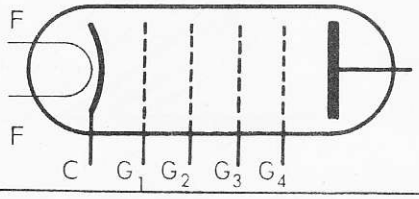
Pent
PENTODE

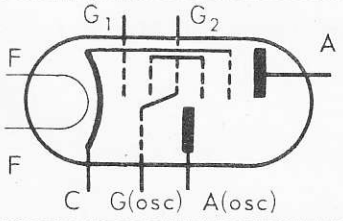




Triode
Hexode

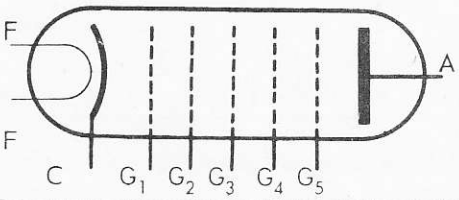
HEXODE



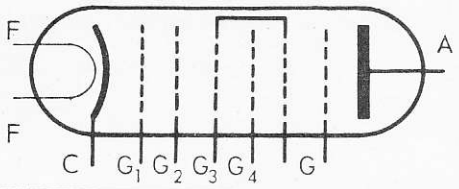


Triode
Heptode

HEPTODE



OCTODE



F Filament
C Cathode
G1 Grille de commande ou osc
G2 Ecran ou plaque osc
G3 Suppressor ou grille d'injection
G4 Ecran
G5 Suppressor ou écran
G6 Suppressor
A Plaque

3 - SEMI - CONDUCTEURS

31 - GENERALITES SUR LES SEMI-CONDUCTEURS

Les semi-conducteurs se caractérisent par les propriétés suivantes :

- Leurs résistivités ont des valeurs intermédiaires entre celles des métaux et celles des isolants (de 10^{-4} à 10^{6} Ω m environ)
- Leurs résistivités diminuent, souvent très vite, lorsque la température croît.
- Leurs résistivités dépendent énormément de leur état de pureté.

CONDUCTIBILITE DES CRISTAUX

1) Généralités

Les metaux (conducteurs et semi-conducteurs) sont, sous leur forme solide habituelle, cristallisés. C'est à dire qu'ils sont constitués par un arrangement régulier d'atomes.

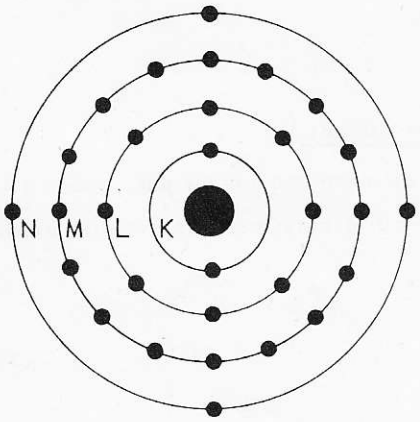
Dans un cristal, les liaisons entre atomes sont assurés grâce aux électrons périphériques. Ceux-ci sont responsables de toute l'activité chimique et électrique du métal.

De façon générale, les liaisons entre atomes ont tendance à se réaliser de telle manière que la couche périphérique possède 8 électrons.

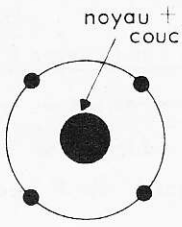
2) Conductibilité des métaux usuels (Cu - Fe - Al

- Les électrons périphériques des atomes sont surabondants pour assurer la cohésion inter-atomique, aussi chaque atome libère en moyenne un électron, qui se déplace entre les autres atomes de façon désordonnée.
- Le moindre champ électrique communique aux électrons libres un mouvement d'ensemble (courant électrique).
- La conductibilité élevée des métaux usuels s'explique par la densité élevée des électrons libres.

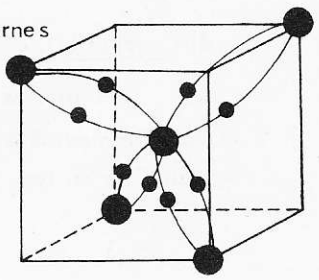
3) Conductibilité des semi-conducteurs intrinsèques.



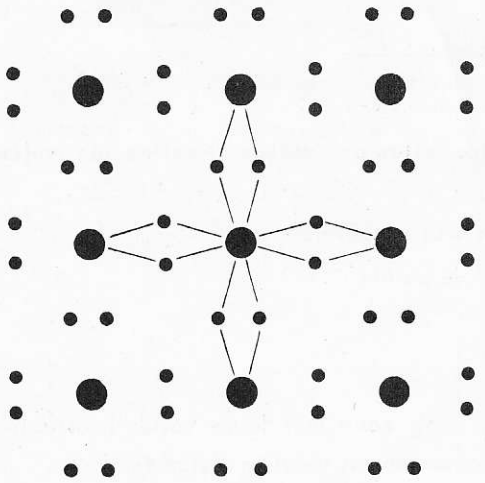
Atome de Germanium



Atome de Germanium simplifié



Maille cubique d'un cristal de Germanium

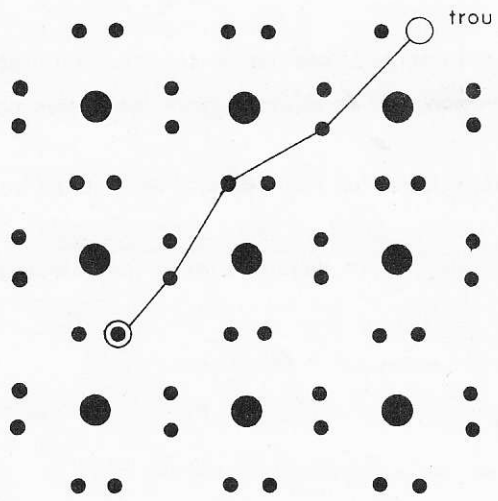


Dans un cristal de germanium chaque atome met en commun ses electrons avec les quatre atomes les plus proches, suivant un arrangement cubique.

Chaque atome est entouré de 8 électrons, ce qui assure une très grande stabilité. Il y a très peu d'électrons libres.

Au voisinage du zéro absolu, aucun électron d'un semi-conducteur n'est libre, et la conductibilité est nulle. Lorsque la température s'élève, certains électrons acquièrent une énergie suffisante pour devenir libres la conductibilité apparaît. Cette conductibilité électronique est beaucoup plus faible mais analogue à celles des métaux usuels.

Une conductibilite lacunaire, ou par trous positifs, particulière aux semi-conducteurs joue également son rôle.



En effet considérons, dans un cristal de Ge pur, électriquement neutre, une liaison ayant perdu un de ses électrons, l'électron libéré a laissé à sa place un trou.

Or ce trou peut capturer :

- un électron libre, il y a recombinaison
- un électron d'une liaison voisine, le trou change alors de position.

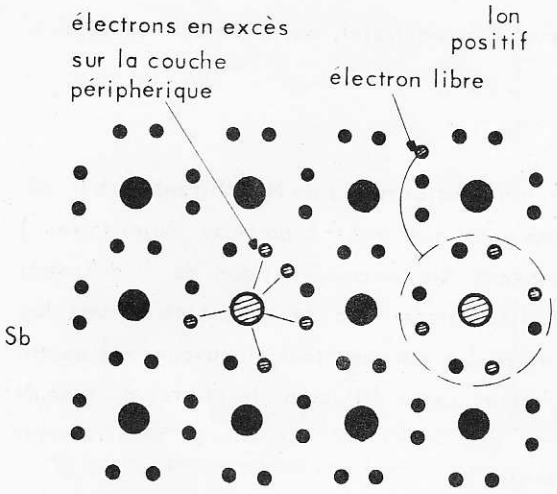
En l'absence de champ électrique le trou se déplace de façon désordonnée.

Si on applique un champ électrique, le trou se déplace dans le sens du champ électrique.

4) Conductibilité des semi-conducteurs Extrinsèques (dopes)

Des atomes étrangers, mélangés avec ceux du semi-conducteur pur, amènent une modification considérable de la conductibilité. La conductibilité ainsi acquise est dite extrinsèque ; elle peut être du type N (négatif) ou P (positif).

311 - SEMI-CONDUCTEUR TYPE N (donneur)



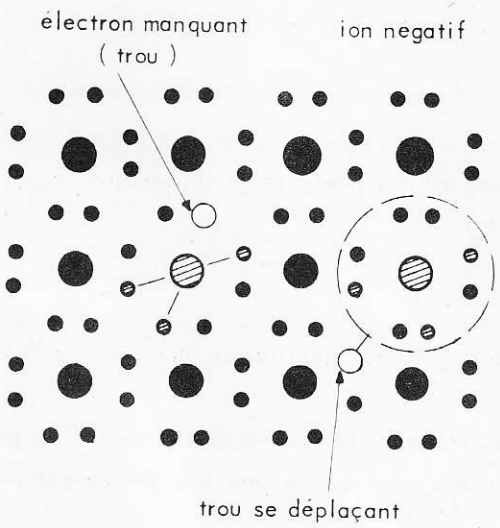
Considérons un cristal de Ge pur dans lequel ont diffusé des atomes étrangers (Ex de l'antimoine Sb) possédant 5 électrons périphériques, 4 d'entre-eux vont participer aux liaisons, le 5ème très faiblement lié, car il est en excès sur la couche périphérique saturée à 8 électrons, va être libéré au moindre apport d'énergie : - d'où une densité d'électrons libres, très supérieure à celle du germanium pur, par suite, la conductibilité électronique est plus élevée.

Si l'électron en excès quitte son atome, il y a création d'une part d'un électron libre, et d'autre part d'un ion positif.

Dans un cristal de Ge type N on appellera :

- Porteurs majoritaires : les électrons
- Porteurs minoritaires : les trous ou lacunes

312 - SEMI-CONDUCTEUR TYPE P (accepteur)



Considérons un cristal de Ge pur dans lequel ont diffusé des atomes étrangers (Ex du Bore) possédant 3 électrons périphériques, il manquera 1 électron dans une liaison, donc chaque atome de bore amènera un défaut d'électron c'est à dire un trou.

Si un électron voisin vient compléter la couche périphérique de l'atome de bore, il y a création d'une part, d'un ion négatif et d'autre part d'un trou se déplaçant dans le cristal.

Dans un cristal de Ge type P on appellera :

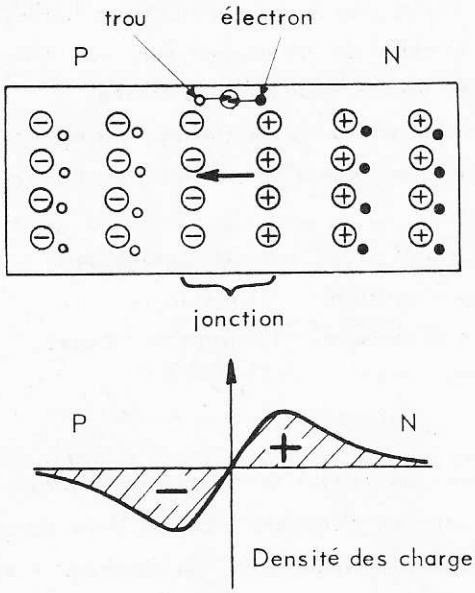
- Porteurs majoritaires : les trous
- Porteurs minoritaires : les électrons.

32 - LA JONCTION P-N

DEFINITION

Une jonction est une région de faible épaisseur d'un monocristal, dans laquelle la conductibilité passe graduellement du type P au type N.

PRINCIPE DE LA JONCTION



Les électrons majoritaires de N diffusent vers P où ils se combinent aux trous (porteurs majoritaires) et disparaissent. De même les trous de P diffusent vers N et disparaissent en se recombinant avec les électrons de N. La matière étant électriquement neutre au départ, après cette diffusion, le cristal du type N ayant perdu des électrons est chargé positivement (ions positifs)

De même le cristal du type P perd des trous, donc se charge négativement (ions négatifs)

Ainsi il apparaît, au niveau de la jonction un champ électrique (E) élevé, dirigé de N vers P

Un équilibre s'établit car :

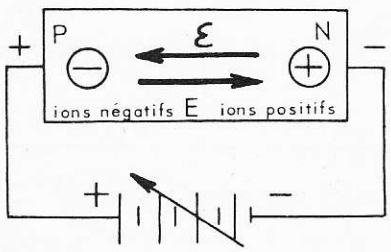
a) Le champ E s'oppose au passage des porteurs majoritaires, seuls réussissent à passer les porteurs possédant une énergie suffisante, c'est à dire :

- quelques trous de P vers N
- quelques électrons de N vers P

b) Par contre le champ E favorise le passage des porteurs minoritaires électrons de P vers N et trous de N vers P.

Ainsi à l'équilibre et en l'absence de tension extérieure : la couche électrique qui se forme à la jonction constitué une couche d'arrêt naturelle. On dit qu'il existe une barrière de potentiel.

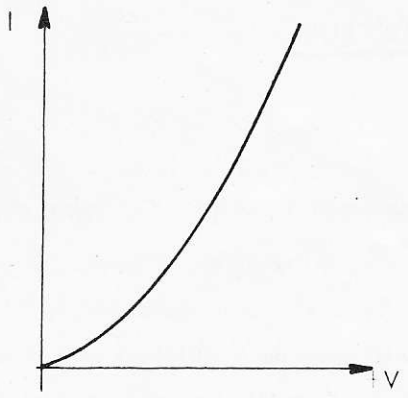
LA JONCTION EST UNE SOUPAPE ELECTRONIQUE (Type diode)



Appliquons à la jonction une source de tension, le plus à P, le moins à N.

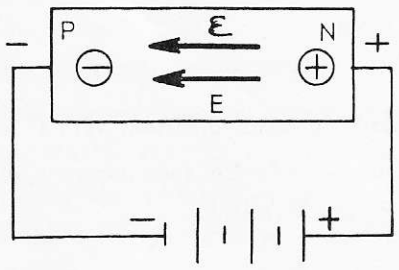
Le champ électrique E dû à la source vient diminuer le champ électrique (ℰ) de la jonction, par suite, les porteurs majoritaires de N (électrons) et de P (trous) franchissent la jonction et se recombinent.

La source fournit les portions majoritaires, ,trous à P et électrons à N.



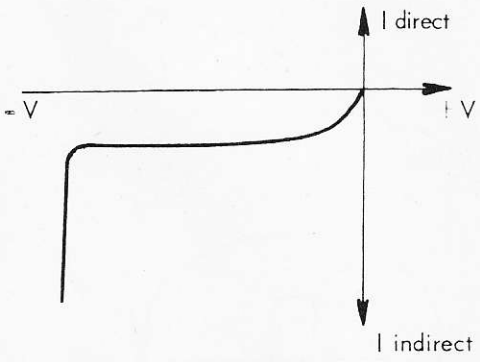
La valeur de la tension de la source détermine l'importance du champ électrique E c'est-à-dire la rapidité de la recombinaison des porteurs majoritaires donc l'intensité du courant.

La jonction est dite polarisée dans le sens direct. La caractéristique I = f (V) ressemble à celle d'une diode à vide.



Si on inverse les polarités de la source, le champ électrique E s'ajoute au champ électrique $\mathcal{E}$ de la jonction, les porteurs majoritaires sont bloqués.

Seuls les porteurs minoritaires captés par le champ électrique passent créant ainsi le courant inverse. Ce courant inverse est fonction de la température, puisque les porteurs minoritaires sont générés par l'agitation thermique.



Si on augmente la tension de la source, le champ électrique régnant dans la jonction croît, et au-delà d'une certaine tension critique, arrache des électrons aux liaisons d'où circulation d'un courant intense pouvant provoquer la destruction de la jonction.

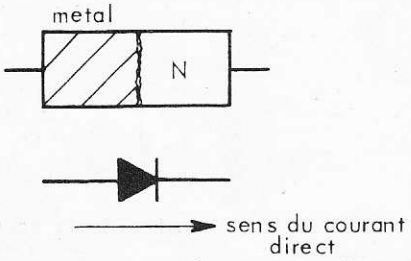
33 - DISPOSITIFS A SEMI-CONDUCTEURS

331 - REDRESSEURS SECS

1) Contact métal- semi-conducteur

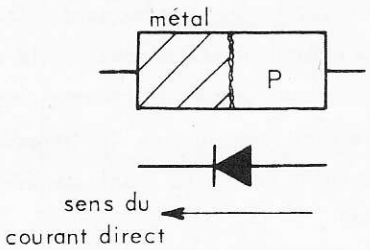
Une barrière de potentiel apparaît dans certains cas au contact d'un métal et d'un semi-conducteur.

2) Contact semi-conducteur type N - métal



Si les électrons de N diffusent vers le métal, nous aurons $V_N > V_{métal}$. Le sens passant du courant est du métal vers N.

3) Contact semi-conducteur type P - métal

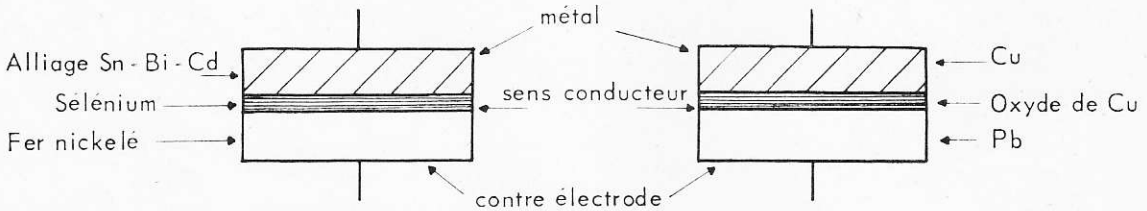


Des électrons du métal diffusent vers P donc nous aurons $V_{métal} > V_P$. Le sens passant du courant est alors de P vers le métal.

4) Constitution d'un redresseur.

De façon générale nous trouvons superposés :

- Une contre électrode chargée de répartir le courant
- Une couche mince de semi-conducteur
- Un métal formant le contact redresseur.



5) Applications

Les redresseurs secs (Selenofer, cuproxyde) sont employés pour le redressement des courants aux fréquences industrielles.

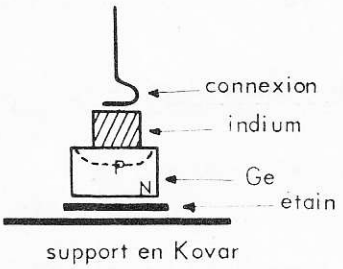
332 - DIODES A CRISTAUX -

Ce sont des redresseurs de faible surface, employés aux moyennes et hautes fréquences.
Les semi-conducteurs utilisés sont le Ge et le Si
Deux types de diodes existent : les diodes à jonction et les diodes à pointes.

1) Diode à jonction

a - Principe de fabrication et de fonctionnement.

Les diodes à jonction utilisent un monocristal de germanium ou de silicium, la jonction peut être obtenue par alliage ou par diffusion.



Pour obtenir une diode on empile sur un support en Kovar : une rondelle d'étain, un petit morceau de germanium type N, et de l'indium (3 électrons périphériques)

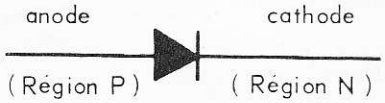
On chauffe entre 550° et 700° pendant quelques instants. L'étain fond et soude le Ge au support. L'indium fond et se soude à la connexion et au germanium.

De plus, l'indium diffuse dans le haut du cristal, qui passe du type N au type P d'où formation d'une jonction.

Le fonctionnement est identique à celui étudié pour la jonction P-N.

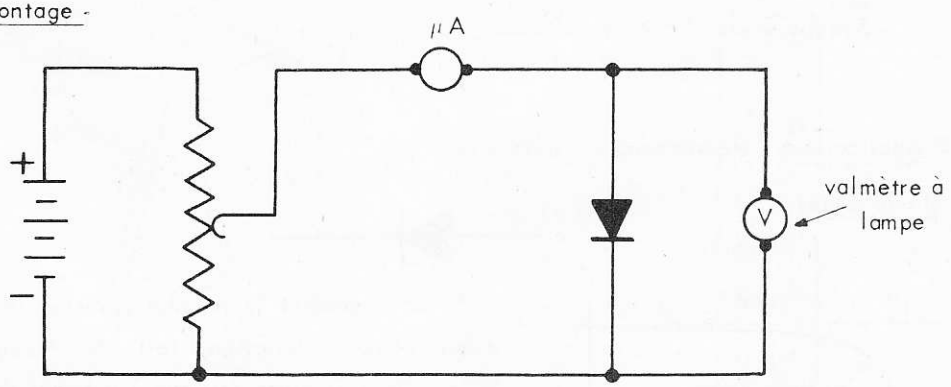
b - Représentation schematique.

Par analogie avec les tubes : la région P est appelée anode
la région N est appelée cathode

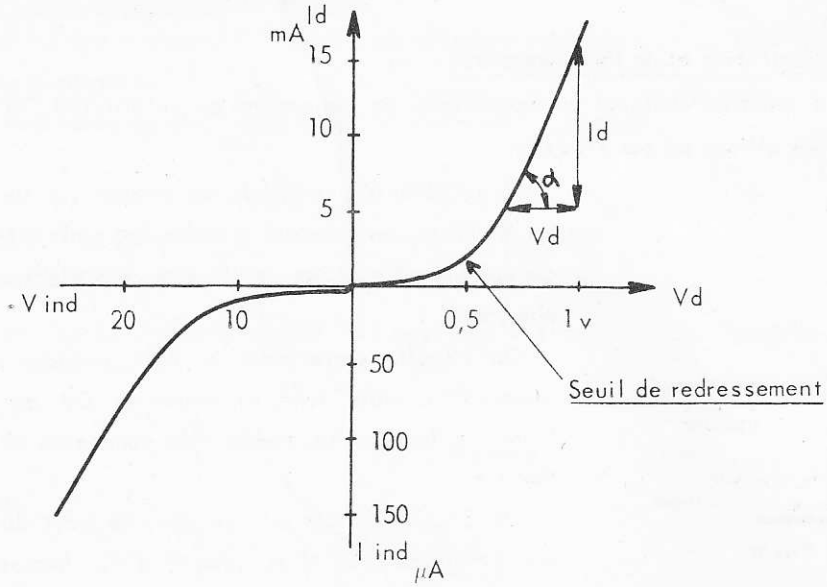


c - Caractéristique.

1) Montage -



2) Analyse de la caractéristique



Polarisation directe : Lorsque l'on augmente la tension (Vd), la croissance du courant est d'abord exponentielle, puis tend à devenir linéaire, on devra utiliser ces diodes dans la partie linéaire.

Polarisation inverse : Le courant inverse croît lentement avec la tension inverse, puis augmente rapidement pouvant provoquer le claquage de la diode.

3) Résistance interne dynamique

Elle se définit comme pour une diode à vide

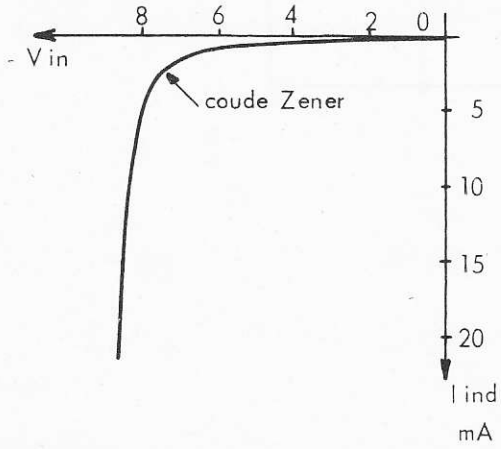
- Sens direct $Rd = \frac{\Delta Vd}{\Delta Id}$

- Sens indirect $Rind = \frac{\Delta V\,ind}{\Delta I\,ind}$

4) Applications : Redressement , détection

2) - Diode Zener

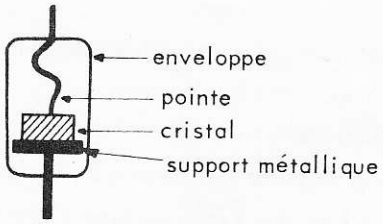
Symbole :



Si on augmente la tension inverse, le champ électrique dans la jonction croît. Au-dessus d'une certaine valeur (champ critique) il rompt des liaisons : la densité des porteurs (électrons et trous) augmente considérablement, et la résistance inverse diminue.

Ce phénomène s'appelle « effet Zener ». Des diodes dites Zener sont spécialement construites pour résister à des courants inverses importants. Elles sont employées comme régulateurs de tension.

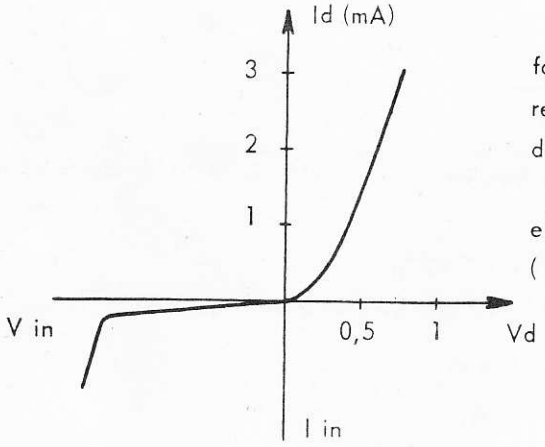
3) - Diode à pointe



a) Constitution

Les diodes à pointe comportent une pointe métallique fine en contact avec un cristal de germanium ou de silicium.

b) Caractéristique et propriétés.



Les diodes à pointe ont des courants directs plus faibles que ceux des diodes à jonction. Le seuil de redressement est plus petit donc permet de meilleures détections.

Leurs capacités parasites sont très faibles, donc elles peuvent travailler à des fréquences très élevées (30 000 MHz).

c) Applications : Détection

4) Avantages des diodes à cristal sur les diodes à vide

- Absence de chauffage
- Encombrement réduit
- Prix peu élevé
- Faible capacité (pour les diodes à pointe)
- Faible résistance directe
- Leur caractéristique présente un coude plus brusque.

34 - LES CELLULES PHOTOELECTRIQUES

GENERALITES : LA LUMIERE

La lumière est une forme d'énergie capable d'impressionner notre oeil. C'est aussi une vibration d'une certaine longueur d'onde transmise à travers l'éther.

La lumière se propage dans l'air à la vitesse de 300 000 km/s.

Quelle que soit la nature de la lumière, on a montré à la suite d'expérience, d'analyse (prisme) et de synthèse (disque de NEWTON) que la lumière blanche est composée d'une infinité de couleurs. Chaque radiation monochromatique est caractérisée par sa fréquence ou sa longueur d'onde : V étant la vitesse dans l'air ou dans le vide.

$$\lambda \text{ (lambda)} = \frac{V}{f}$$

Ces radiations s'étendent sur une bande de fréquence de 4.10^{14} à 7.10^{14} Hertz soit de 7 000 angströms à 4 000 angströms

(1 Å (1 Angströms) = 10^{-8}cm = $10^{-4}\mu$m

La lumière se décompose conventionnellement en 7 couleurs de base.

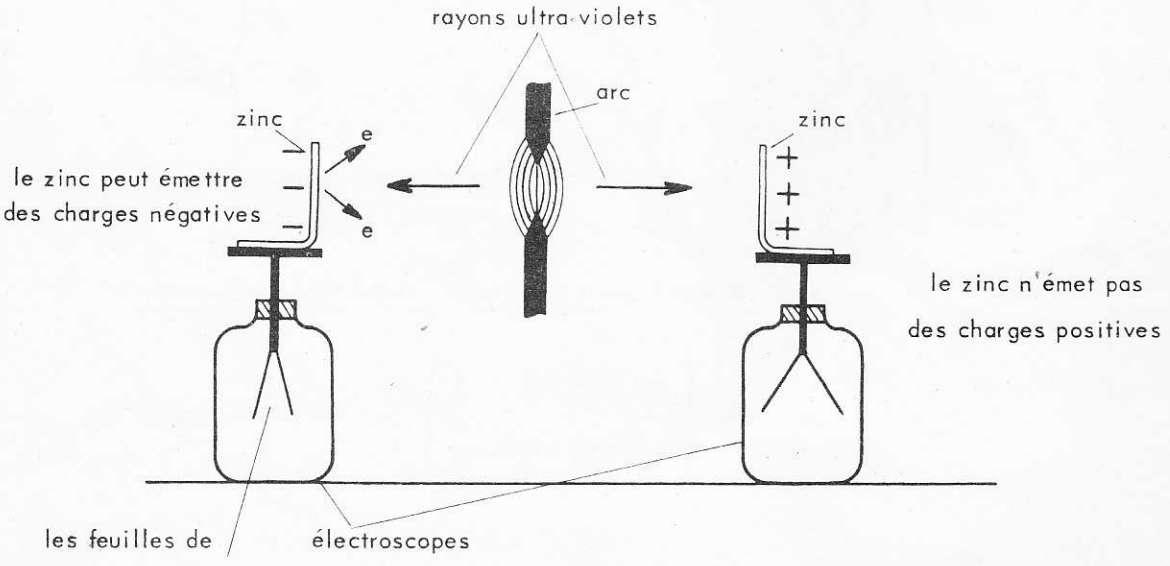
Rouge	Orange	Jaune	Vert	Bleu	Indigo	Violet
6 200 Å	5 950 Å	5650 Å	4 900 Å	4600 &	4 000 Å	

La sensibilité de l'oeil dépend de la couleur de la lumière.

EFFET PHOTOELECTRIQUE

Un métal frappé par une radiation lumineuse convenable émet des électrons ; ce phénomène porte le nom d'effet photoélectrique. On le met facilement en évidence en éclairant par un faisceau de lumière riche en rayons ultra violets une plaque de zinc posée sur le plateau d'un électroscope chargé. Si l'électroscope est chargé négativement, il se décharge s'il porte de l'électricité positive il la conserve.

Dans le premier cas les électrons émis par le zinc sont repoussés, dans le second cas ils sont attirés et ils retournent à la plaque de zinc.



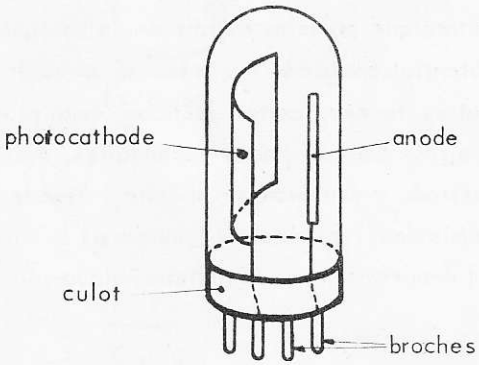
341 - LES CELLULES PHOTOEMISSIVES -

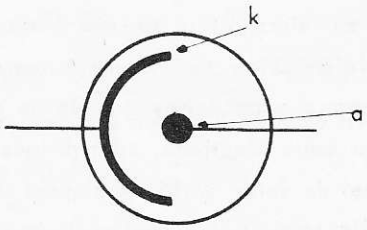
Les cellules à vide -

Principe - Le flux lumineux reçu par une photocathode extrait par effet photoélectrique des électrons qui constituent une charge d'espace au voisinage de la surface émissive.

Pour capter tous les électrons émis par cette photocathode il est nécessaire que la tension anodique dépasse une certaine valeur positive Va.

Note - Une photocathode est un corps qui frappe par des photons (lumière) émet des électrons. Ce sont en général des semi conducteurs à faible travail d'extraction électronique.





Représentation schématique

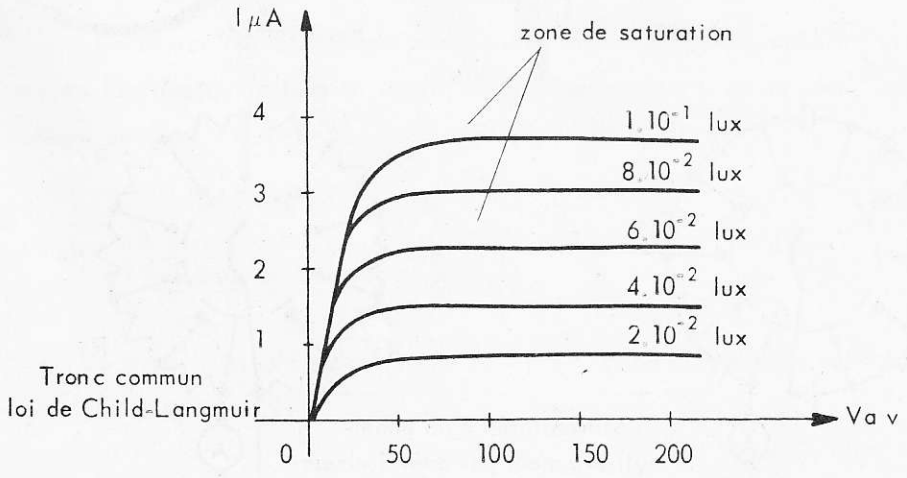
Constitution -

- Une photocathode (surface émissive). Les photocathodes au césium sont le plus souvent employées.
- Une anode. (réduite le plus souvent à une simple tige métallique)
- Une enceinte en verre
- Un culot
- Des broches

Caractéristique courant tension -

Cette caractéristique ressemble à celle d'une diode thermoionique.

- Le régime de la charge d'espace - Loi de CHILD-LANGMUIR.
- Le régime de saturation $Ia = G\,Va^{\frac{3}{2}}$



Courant d'obscurité -

C'est le courant débité dans le circuit extérieur d'un tube photoélectronique en l'absence d'irradiation.

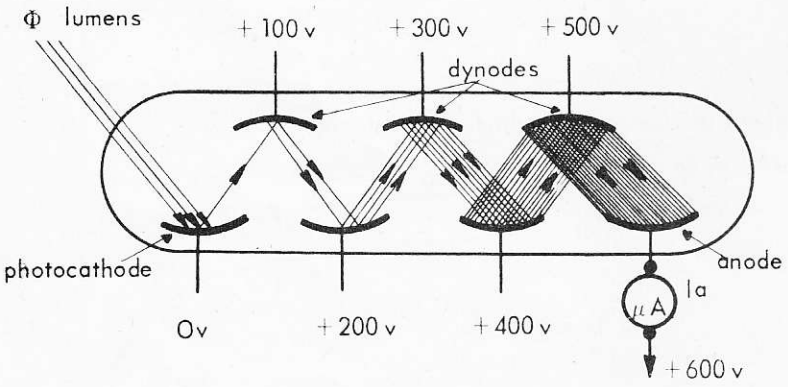
Emploi : - détecteur de fumées
- cinéma sonore
- comptage d'objets
- protection des machines.

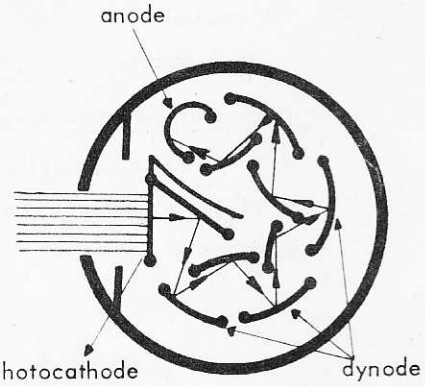
Photomultiplicateurs -

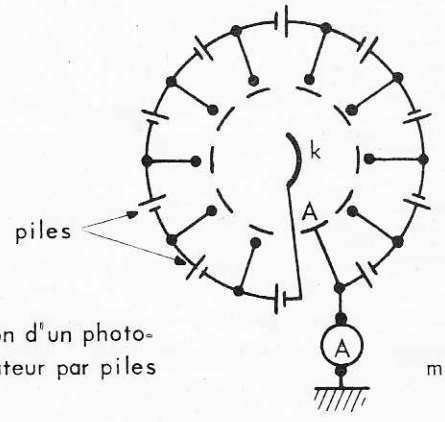
Un photomultiplicateur est une cellule à vide poussé. Des électrons primaires sont émis par la cathode sous l'action de la lumière et sont alors multipliés ou amplifiés à l'aide d'une émission secondaire. Pour obtenir ce résultat, le courant électronique primaire extrait de la photocathode est alors dirigé sur une électrode maintenue à un potentiel positif et qui présente un coefficient d'émission secondaire supérieur à l'unité. En d'autres termes, cette électrode émet plus d'électrons secondaires qu'elle ne reçoit d'électrons primaires. Les électrons secondaires, éjectés par cette électrode, sont dirigés vers une seconde électrode à émission secondaire (dynode) et ainsi de suite, si bien qu'après une succession de 10 émissions secondaires (ou plus) le courant électronique final est collecté par la véritable anode. (documentation « la radiotechnique »)

Constitution -

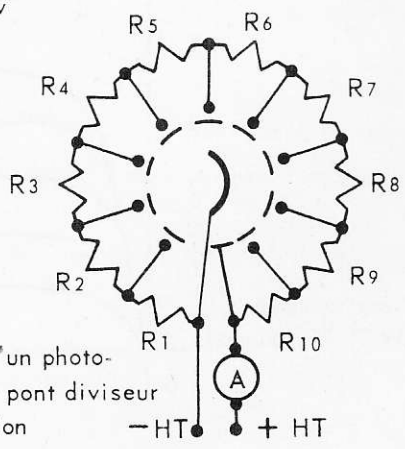
- Une photocathode. (Le plus souvent semi transparente et déposée sur du verre poli). Elle est éclairée à travers le verre et émet des électrons par l'autre face.
- Des multiplicateurs d'électrons. (dynodes)
- Une anode qui collecte les électrons reçus par la dernière dynode.
- Une enceinte de verre.
- Un culot.
- Des broches.







Alimentation d'un photomultiplicateur par piles



Alimentation d'un photomultiplicateur par pont diviseur de tension

Note -

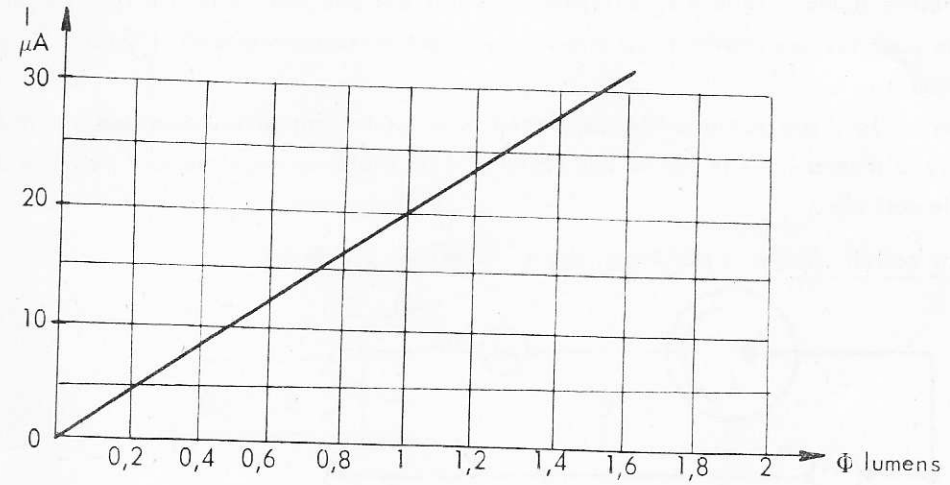
- Le LUMEN est l'unité de flux lumineux. C'est le flux lumineux émis, dans un angle solide d'un stéradian, par une source ponctuelle uniforme, ayant une intensité lumineuse de 1 candéla.
- Le STERADIAN est une unité d'angle solide ayant comme base la surface du rayon au carré prise sur une sphère ponctuelle.
  Soit : surface de la sphère $4\pi R^2$; Le stéradian est l'angle solide ayant comme base $S/4\pi$ et l'angle solide total est 4π stéradians.
- Le CANDELA est l'unité d'intensité lumineuse ou luminescence.

Propriété pratique des tubes photoélectriques -

La sensibilité lumineuse statique est le quotient du courant anodique contenu par le flux lumineux incident supposé constant pour une tension donnée entre anode et cathode.

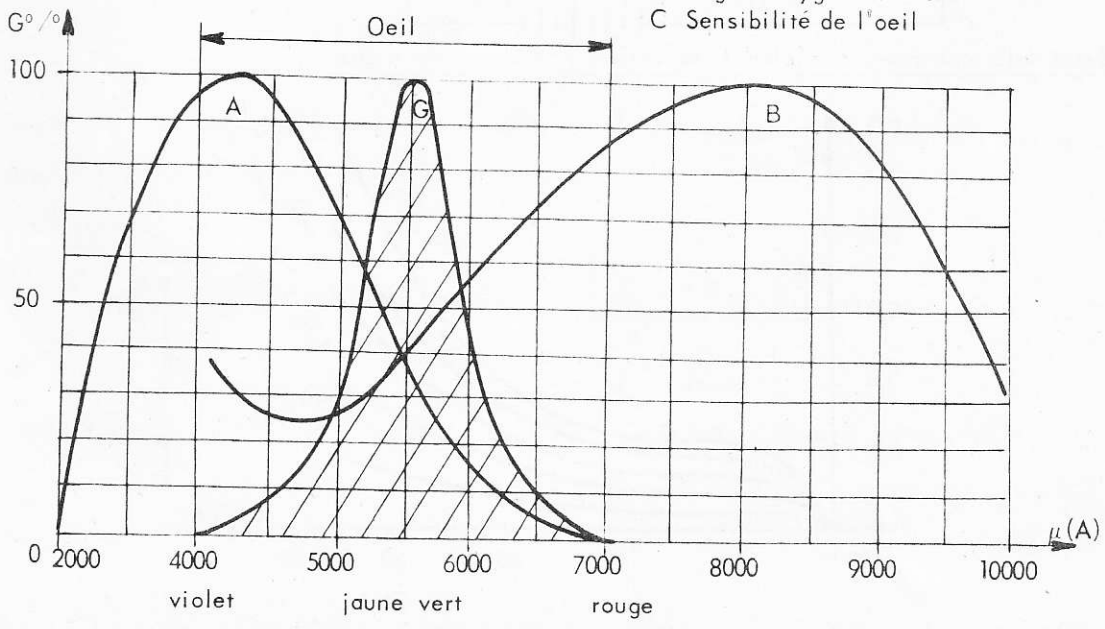
$$S_{A/lm} = \frac{Ia}{\Phi\ lm} \qquad (lm : lumen)$$

la sensibilité s'exprime en ampères par lumens.



Caractéristique spectrale des tubes photoélectriques -

A Cathode antimoine Césium
B Argent oxygène césium
C Sensibilité de l'oeil



Amplification d'un photomultiplicateur

$$A = \frac{I_a}{I_k} \qquad 10^6 \text{ avec } 10 \text{ dynodes}$$

Applications : - Mesure des flux lumineux
- Détection et mesure des rayonnements

Cellules photoémissives à gaz -

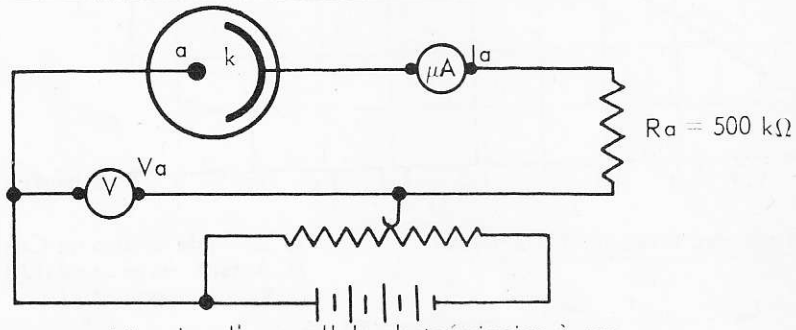
Même description que les cellules à vide, mais l'ampoule est emplie d'argon à basse pression.

Avantages : La principale différence entre les caractéristiques de ces 2 types de cellules est attribuable à l'effet d'amplification par le gaz (émission secondaire). Grâce à cet effet la sensibilité d'une cellule photoélectrique à remplissage gazeux est beaucoup plus grande que celle d'une cellule à vide poussé de même dimension.

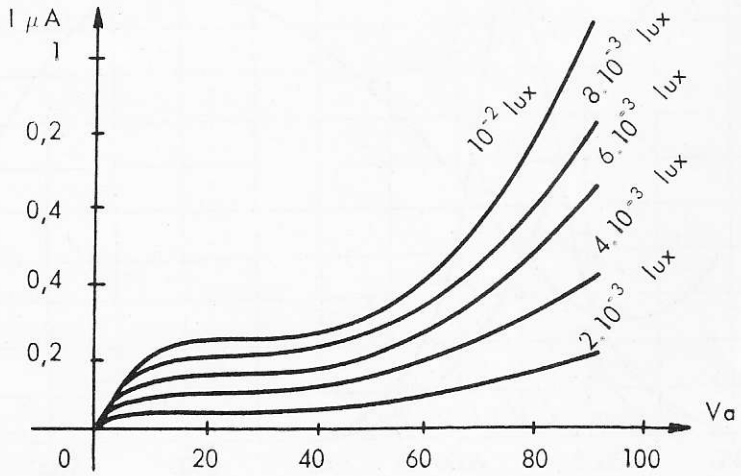
Inconvénients :

- La sensibilité d'une cellule à remplissage gazeux n'est pas constante. Ce type de tube ne convient pas pour les applications ou interviennent des mesures précises. (inertie du phénomène d'ionisation).
- Si la tension anodique est trop élevée, il peut y avoir ionisation et même arc électrique, Il est nécessaire d'insérer dans le circuit une résistance de quelques mégohms pour éviter la détérioration de la cathode.

Montage d'une cellule à gaz (même montage q'une cellule à vide)



Caractéristique courant tension d'une cellule photoémissive à gaz .



Emploi : - Commande des relais
- Comptage d'objets
- Protection des machines

342 - CELLULES PHOTOCONDUCTIVES -

La photoconduction est un effet photoélectrique se manifestant par une diminution de la résistivité du corps irradié.

La résistivité d'un semi-conducteur varie avec l'éclairement (les photons incidents libèrent des porteurs de charge)

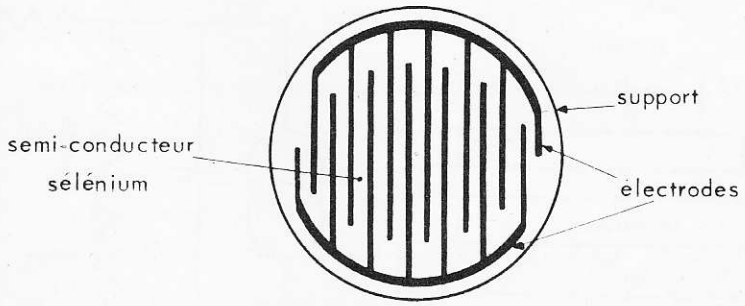
Description -

- Un support, plaque isolante, de verre, céramique ou mica est recouverte de peinture sur l'une de ses faces.

- Deux électrodes d'or, de platine, ou de graphite en forme de peignes, imbriquées l'une dans l'autre.

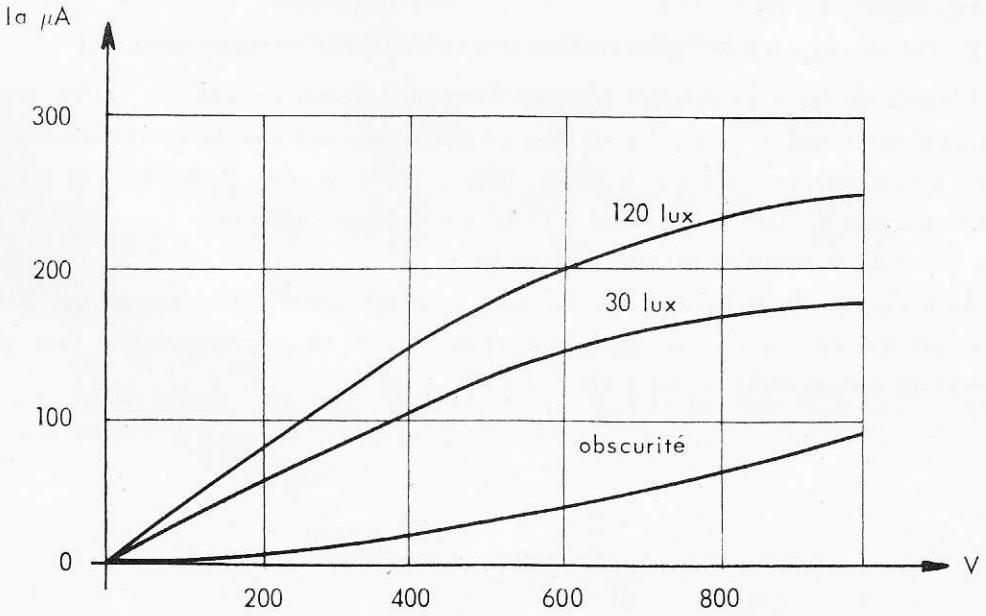
- Un semi-conducteur, du sélénium sous forme vitreuse est déposé en couche mince entre ces 2 électrodes.

- Un ballon de verre rempli de gaz inerte.



Propriétés :

Influence de la tension anodique et de l'éclairement.



La sensibilité est élevée mais ces cellules ne sont pas stables.

Ces cellules sont sensibles à la température.

Emploi : - Commande des relais

- Servomécanisme du genre suiveur de spot
- Très recherchées car elles sont sensibles à l'infra rouge
- Dispositif d'alarme
- Contrôle de flamme ou de fumée.

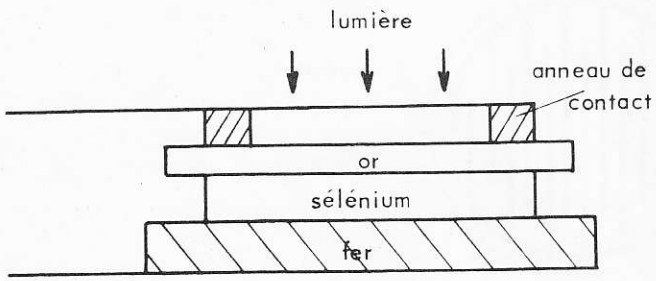
343 - CELLULES PHOTOVOLTAIQUES - CELLULES A COUCHES D'ARRET - PHOTOPILES)

Principe -

Ces cellules sont basées sur un phénomène découvert par BECQUEREL en 1839. Au contact d'un semi conducteur illuminé (silicium) et d'un métal (acier doux) il apparaît une force électromotrice. (Effet photovoltaique)

Description -

- Un support de fer nickelé sur lequel est étalé une couche de sélénium.
- Le sélénium est ensuite recouvert d'une couche transparente d'or ou d'argent au contact de laquelle se manifeste l'effet photovoltaique.



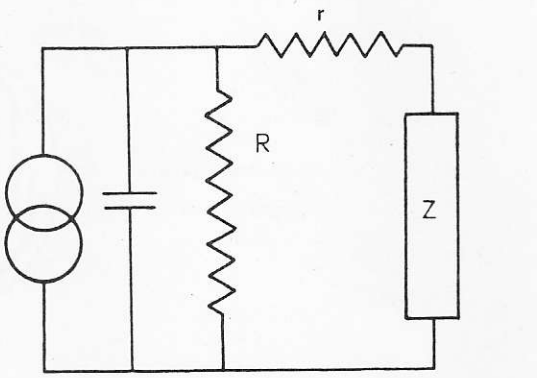


Schéma équivalent

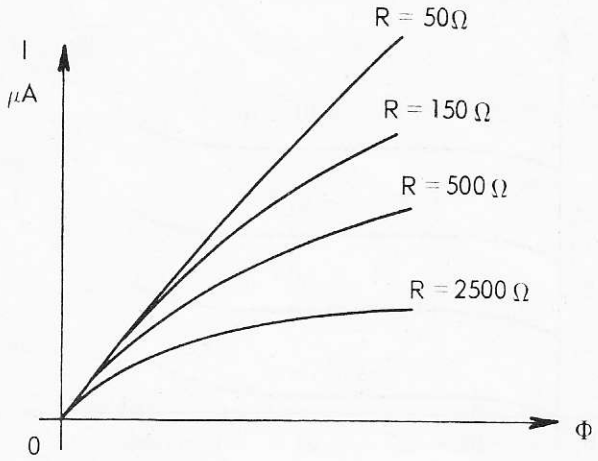
Fonctionnement -

En l'absence de lumière le contact fer sélénium possède certaines propriétés :

L'atome de fer a sa dernière couche incomplète, or les électrons de la dernière couche de sélénium sont relativement libres. Ils tendent donc à aller compléter la couche externe de l'atome de fer et s'accumulent à la surface du métal, laissant dans le semi conducteur une charge positive. Il apparaît donc une barrière de potentiel à l'intérieur du semi conducteur. Cette barrière interdit aux électrons libres du sélénium de pénétrer dans le fer.

Sous l'action de la lumière, les électrons reçoivent une certaine énergie qui leur permet de franchir la barrière de potentiel. On observe alors un courant se dirigeant dans le sens sélénium-fer. (documentation manuel électronique école de l'air)

Caractéristiques d'utilisation



Emploi :

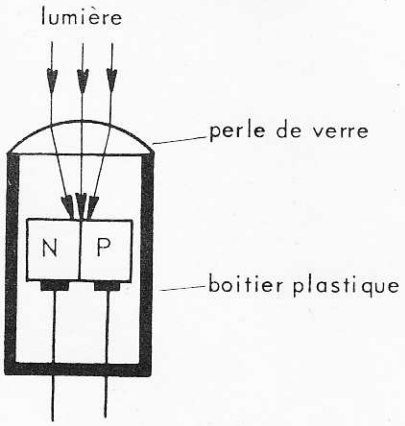
- Luxmètre
- Posemètre

344 - PHOTODIODES -

Principe -

En éclairant la jonction d'une diode jonction normalement bloquée, on libère, par les photons incidents, des porteurs qui rendent la diode conductrice.

Ces cellules sont sensibles à l'infra rouge et à l'ultra violet. Le principe de fabrication est le même que celui utilisé pour la fabrication des diodes normales et des transistors.



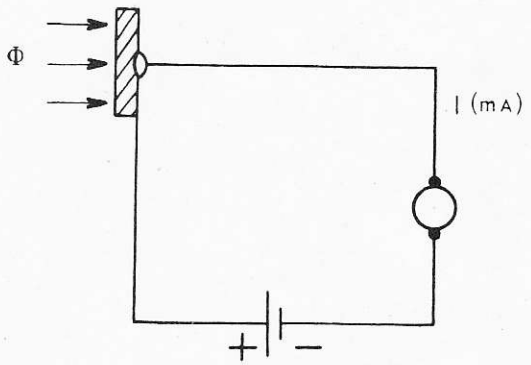
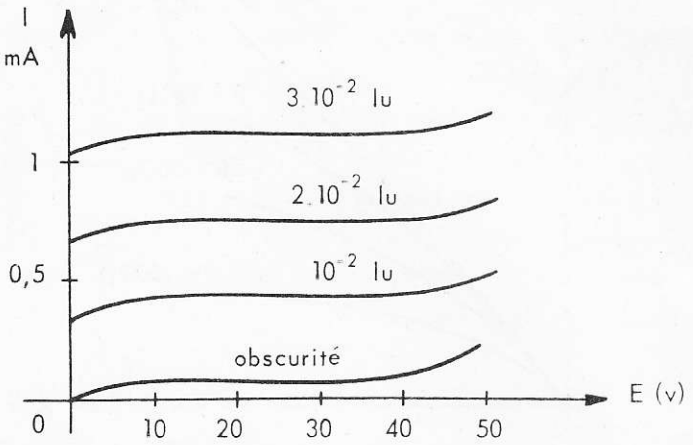


Schéma de principe

Caractéristique courant tension d'une photo diode



Emploi :

- Servomécanisme -
- Dispositif suiveur du spot
- Contrôle des machines

35 - TRANSISTORS

GENERALITES

La découverte du transistor (1948), est la plus révolutionnaire de l'électronique depuis celle de la triode (1907).

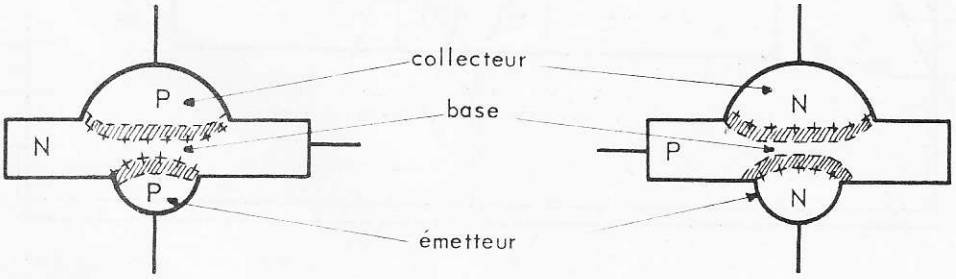
Les transistors sont des éléments amplificateurs à semi-conducteurs, qui remplacent de plus en plus les tubes à vide avec comme avantages sur ceux-ci :

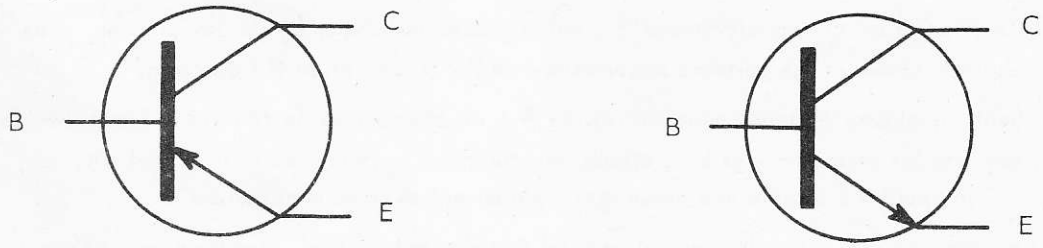
- Encombrement et poids plus faibles, permettant de les monter sans support dans le cablage.
- Consommation plus faible (pas de chauffage, tension d'alimentation de quelques volts seulement.
- Grande robustesse.
- Fonctionnement immédiat dès la mise sous tension.

DEFINITION

Un transistor est formé d'un petit monocristal (germanium ou silicium) dans lequel sont réalisées deux jonctions très voisines. Deux régions de même type de conductibilité, l'émetteur et le collecteur, sont séparées par une très mince région de type opposé, la base.

Il existe donc des transistors P.N.P. et des transistors N.P.N.





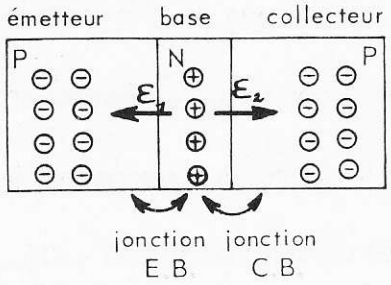
Symbole des transistors

P.N.P.

N.P.N.

FONCTIONNEMENT

Le transistor n'est pas sous tension.



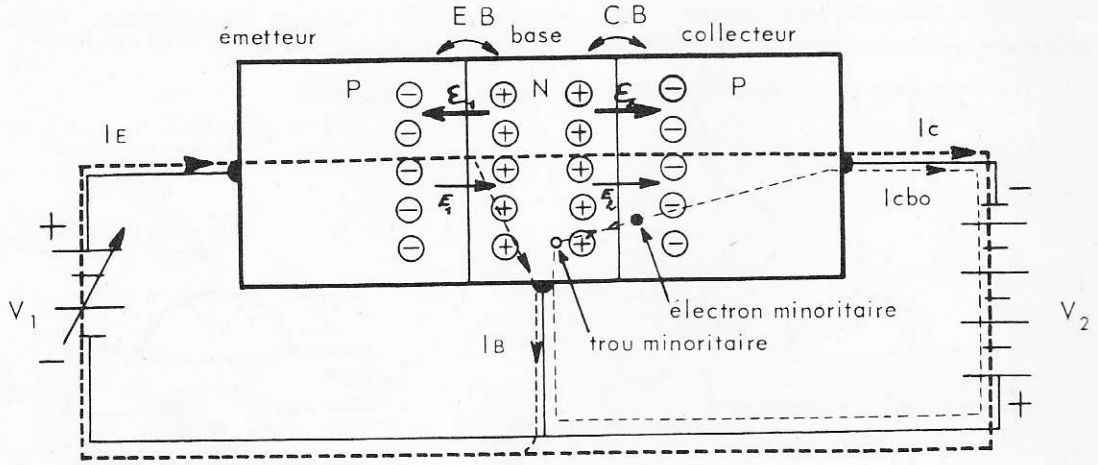
Au moment de la formation des jonctions, les trous (porteurs majoritaires) de P diffusent dans N, et les électrons (porteurs majoritaires) de N diffusent dans P. Il y a création de deux barrières de potentiel ayant leurs champs électriques dirigés de N vers P.

Ces champs électriques, $\mathcal{E}_1$ pour la jonction EB et $\mathcal{E}_2$ pour la jonction CB, bloquent les porteurs majoritaires.

Le transistor est formé, et, est prêt à être mis sous tension.

Le transistor est sous-tension.

- Montage base commune



- La jonction CB est polarisée en sens inverse, c'est à dire : base positive par rapport au collecteur, donc :

1) Création d'un champ électrique E_2 qui s'ajoute au champ $\mathcal{E}_2$ de la jonction. Ces deux champs bloquent les porteurs majoritaires de P (trous) et de N (électrons).

2) Seuls quelques porteurs minoritaires de P (électrons) et de N (trous) passent, favorisés par les champs $_2$ et E_2, créant un courant de porteurs minoritaires : I_{CB_0}.
Ce courant d'origine thermique croît rapidement avec la température.

- La jonction EB est polarisée en sens direct ; c'est à dire : émetteur positif par rapport à la base, donc :

1) Création d'un champ électrique E_1, qui diminue le champ $\mathcal{E}_1$ de la jonction EB. Les porteurs majoritaires de l'émetteur (trous) peuvent franchir la jonction, et passer dans la base. L'épaisseur de celle-ci étant nettement inférieure à la longueur de diffusion des

trous, la presque totalité des trous (97°/° à 99°/°) parvient à la jonction CB. Les trous sont alors captés par le champ résultant ($E_2 + \mathcal{E}_2$) et vont se combiner avec les électrons du collecteur et par suite de la source V_2 formant ainsi le courant du collecteur I_C

Quelques trous (1°/° à 3°/°) se combinent avec les porteurs majoritaires de la base (électrons) et forment le courant de base I_B.

- En examinant le fonctionnement physique de transistor on déduit que :

I_C = 97 à 99°/° de I_E

Ce pourcentage est représenté par la lettre α, et prend le nom de rapport de transfert ou de coefficient d'amplification de transistor monté en base commune.

$$\alpha = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E} \qquad \Delta I_C < \Delta I_E \quad \text{donc} \quad \alpha < 1$$

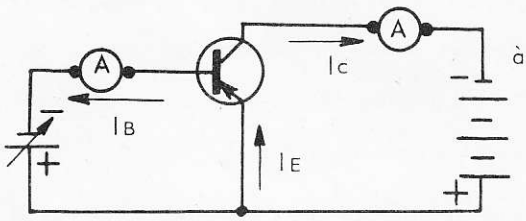
Egalement on déduit que : $I_C = \alpha I_E$, mais il convient de tenir compte du courant résiduel, donc :

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO}$$

On remarque aussi que :

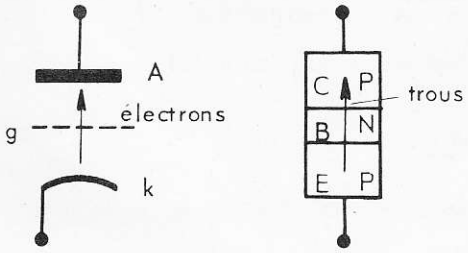
$$I_E = I_C + I_B$$

- Montage émetteur commun



Ce montage est le plus employé, il est similaire à celui d'une triode montée avec la cathode à la masse.

a) Comparaison avec la triode



L'émetteur émet des porteurs (trous), la cathode de la triode émet des porteurs (électrons).

- La base, électrode de commande, correspond à la grille.
- Le collecteur capte les porteurs comme le fait l'anode.

b) Commande par la base

Si on fait varier la tension base-émetteur, le courant I_B varie de ΔI_B ce qui provoque une variation ΔI_C du courant collecteur.

Le coefficient d'amplification en courant est :

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

$\Delta I_C > \Delta I_B$ donc $\beta > 1$ le montage amplifie en courant

c) Relation entre α et β

$$\boxed{\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}} \qquad \text{mais } \Delta I_B = \Delta I_E - \Delta I_C$$

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E - \Delta I_C}$$ divisons les deux termes de la fraction par ΔI_E

$$\beta = \frac{\frac{\Delta I_C}{\Delta I_E}}{\frac{\Delta I_E}{\Delta I_E} - \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E}} \qquad \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E} = \alpha \text{ donc } \boxed{\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}}$$

Ex : $\alpha = 0{,}98$ - Calculer β

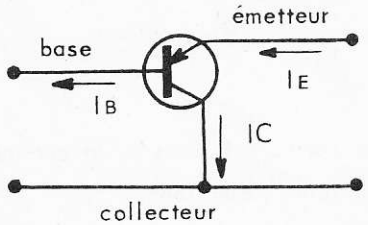
$$\beta = \frac{0{,}98}{1 - 0{,}98} = \frac{0{,}98}{0{,}02} = 49$$

δ) Valeur du courant de collecteur

Le courant collecteur I_C d'après la relation β serait égal à βI_B, mais il faut tenir compte du courant résiduel entre l'émetteur et le collecteur (I_{CEO}) dont la valeur approximative est : $I_{CEO} = \beta I_{CBO}$ donc :

$$I_C = \beta I_B + I_{CEO}$$

- Montage collecteur commun



Ce montage est utilisé dans certains cas, car il présente des avantages que nous étudierons au chapitre « Amplificateurs ».

- Coefficient d'amplification en montage collecteur commun -

$$\boxed{\gamma = \frac{\Delta I_E}{\Delta I_B}}$$

Dans cette expression $\Delta I_E > \Delta I_B$ donc $\gamma > 1$, ce montage amplifie en courant.

- Relation de γ avec α

$$\gamma = \frac{\Delta I_E}{\Delta I_B} \qquad \text{mais } \Delta I_B = \Delta I_E - \Delta I_C$$

$$\gamma = \frac{\Delta I_E}{\Delta I_E - \Delta I_C}$$ divisons par ΔI_E

$$\gamma = \frac{1}{1 - \alpha}$$

: Relation de γ avec β

$$\gamma = \frac{\Delta I_E}{\Delta I_B} \qquad \text{mais } \Delta I_E = \Delta I_C + \Delta I_B$$

$$\gamma = \frac{\Delta I_C + \Delta I_B}{\Delta I_B} \qquad \text{divisons par } \Delta I_B$$

$$\gamma = \beta + 1$$

351 - ETUDE DES PARAMETRES

Généralités

Comme pour les tubes, on peut pour les transistors définir les paramètres, qui permettent de calculer les amplifications en tension et en courant des montages utilisant des transistors.

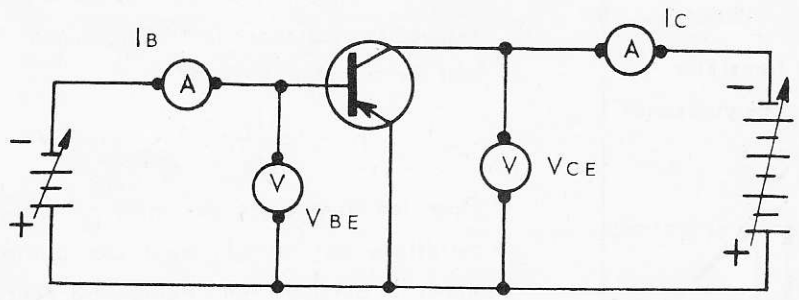
Le montage émetteur commun étant le plus utilisé, nous définirons les paramètres fondamentaux pour ce montage.

Conditions d'alimentation

Les transistors travaillent généralement avec des tensions d'alimentation (tension entre collecteur et émetteur) comprises entre 1 v et 100 v. L'intensité du courant est de l'ordre du milliampère pour les transistors HF et préamplificateur et, atteint plusieurs ampères pour les transistors BF de puissance.

Le transistor ne demande aucune puissance de chauffage, son rendement est relativement bon, mais il est assez sensible aux surtensions et aux variations de température.

- Montage pour relever les caractéristiques -



- Caractéristique $-I_C = f(-V_{CE})$

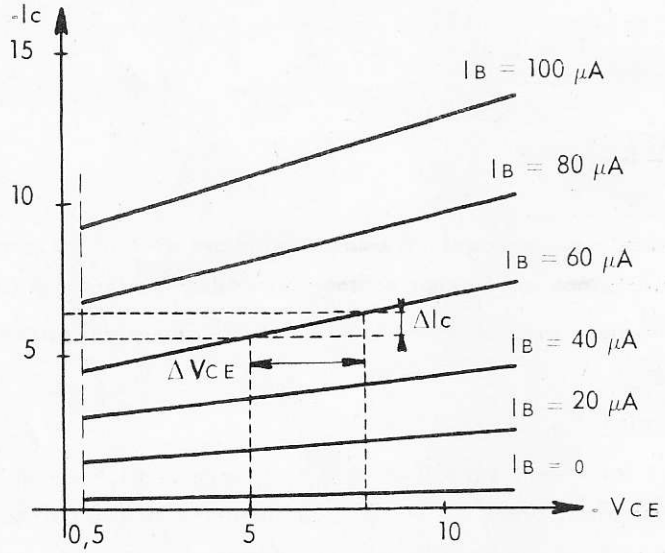
Pour relever une caractéristique :

On fait varier V_{CE}, on relève les valeurs correspondantes de I_C en maintenant I_B constant.

On obtient un réseau de caractéristiques ressemblant au réseau $Ia = f(Va)$ d'une pentode.

En observant ce réseau nous remarquons :

- les caractéristiques sont sensiblement rectilignes jusqu' aux tensions V_{CE} très faibles (0,5 V)
- le courant résiduel I_{CEO} est très faible ($I_{CEO} \# \beta I_{CBO}$)
- l'inclinaison (pente géométrique) augmente vite avec le courant de collecteur (I_C), donc Rs diminue.

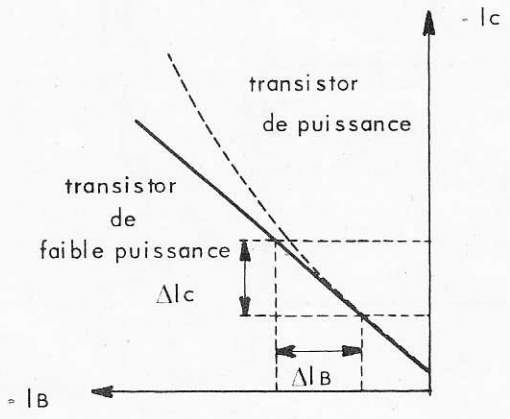


Ce réseau permet de déterminer la résistance dynamique de sortie (Rs)

$$Rs\ \Omega = \frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_C} \qquad \text{pour } I_B \text{ constant}$$

Suivant le transistor (faible puissance ou grande puissance) la résistance de sortie peut varier de quelques centaines d'ohms à quelques dizaines de Kilohms. Ex : OC70 - Rs = 10 KΩ

- Caractéristique $-I_C = f(-I_B)$

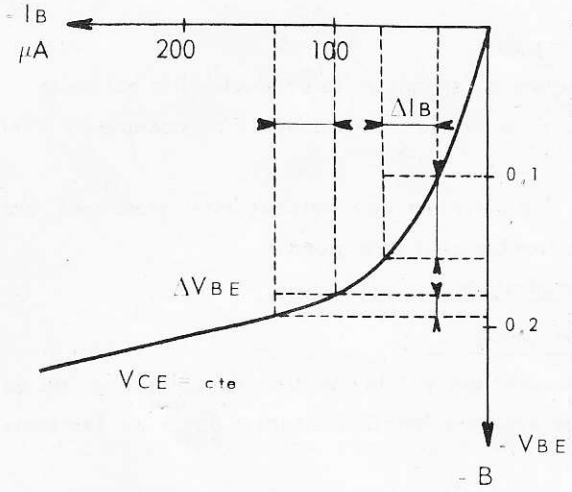


- On fixe une V_{CE} constante, on fait varier I_B, on relève I_C correspondant. La courbe obtenue permet de calculer β

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \qquad \text{avec } V_{CE} \text{ constante}$$

Pour les transistors de petite puissance, la caractéristique est sensiblement une droite par conséquent β est constant. Par contre pour les transistors de puissance, la caractéristique n'est pas linéaire, β n'est pas constant, cela peut amener la déformation du signal lors de son amplification.

- Caractéristique - V_{BE} = f (- I_B)



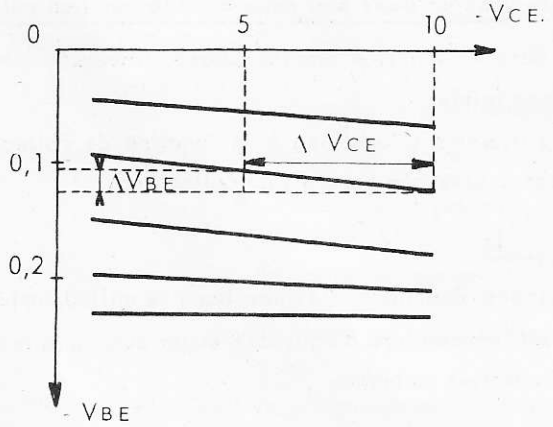
On maintient V_{CE} constante, on fait varier I_B, on relève V_{BE} correspondante.

La caractéristique obtenue permet de déterminer la résistance d'entrée du transistor.

$$re = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B} \qquad \text{avec } V_{CE} \text{ constante}$$

La résistance d'entrée est une grandeur très importante, car elle est relativement faible, généralement de l'ordre du Kilohms pour les transistors de petite puissance et de quelques dizaines d'Ohms pour les transistors de puissance.

- Caractéristique - V_{BE} = f (- V_{CE})



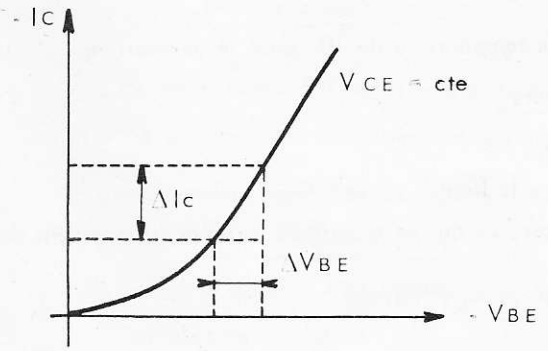
On fait varier V_{CE}, en maintenant I_B constant, on relève les valeurs correspondantes de V_{BE}.

La caractéristique obtenue permet de déterminer le taux de contre réaction interne du transistor.

$$\mu = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta V_{CE}} \qquad \text{pour } I_B \text{ constante}$$

Cette contre réaction est due à la présence de la résistance interne base collecteur.

- Caractéristique - I_C = f (- V_{BE})



On fait varier V_{BE} en maintenant V_{CE} constante, on relève I_C correspondant.

La caractéristique obtenue permet de déterminer la pente du transistor.

$$S = \frac{\Delta I_C}{\Delta V_{BE}} \qquad \text{pour } V_{CE} \text{ constante}$$

352 - EFFETS DE LA TEMPERATURE -

1) Variation de la conductibilité.

Considérons un morceau de semi-conducteur dopé :

- au zéro absolu : aucun donneur ou accepteur n'est ionisé, la conductibilité est nulle.
- quand la température est supérieure au zéro absolu : les donneurs ou accepteurs s'ionisent et libèrent des porteurs majoritaires.
- puis, si la température s'élève encore il y a rupture des liaisons inter atomiques, donc apparition de porteurs minoritaires dont le nombre peut être grand.
- La conductibilité est fonction de la température

2) Un transistor est sensible à la température ambiante.

Dans un transistor, la région la plus chaude, qui est la jonction du collecteur, ne doit pas dépasser, sous peine de détérioration et de mauvais fonctionnement : 85° pour les transistors au germanium et 150° pour ceux au silicium.

Un transistor travaille donc à une température proche de la température ambiante. Si cette température ambiante change, la température de la jonction de collecteur change aussi et peut atteindre la température critique.

3) La totalité de la puissance thermique dissipée dans un transistor apparaît à la jonction collecteur.

Les chutes de tension dans le cristal et dans la jonction émetteur-base, traversée par un courant direct, sont faibles ; les pertes sont donc faibles.

Au contraire, la tension V_{CE} est presque entièrement localisée à la jonction de collecteur qui travaille en courant inverse, toute la puissance dissipée apparaît au collecteur.

$$P_C = V_{CE} \times I_C$$

Si la puissance P_C est constante, la puissance thermique dissipée dans le milieu ambiant est égale à P_C. La jonction collecteur prend une température d'équilibre supérieure à la température du boîtier, elle-même supérieure à la température ambiante.

4) Le courant résiduel de collecteur croît avec la température.

Le courant résiduel de collecteur croît très vite (exponentiellement) avec la température, ce qui accroît les pertes et élève la température, d'où un nouvel accroissement du courant, et ainsi de suite. Dans certains cas, cet effet cumulatif provoque l'emballement thermique du transistor.

I_{CBO} double à peu près pour une élévation de température de 10° pour le germanium.

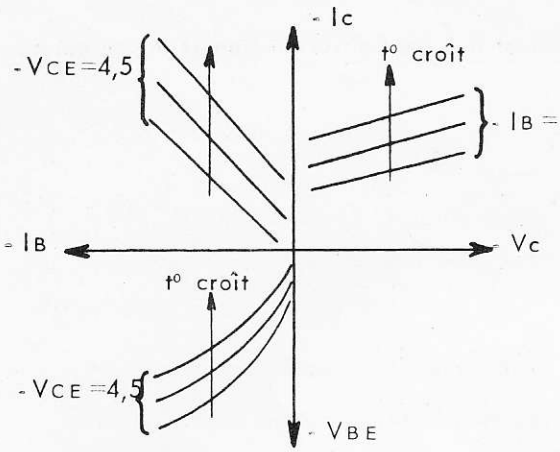
- Déplacement des caractéristiques avec la température.

Une augmentation de la température provoque :

- Un déplacement de caractéristiques vers le haut.
- Une modification de l'angle d'inclinaison, ce qui se manifeste par l'accroissement de β et la diminution de Rs.

En résumé :

L'augmentation du courant collecteur avec la température est due à trois phénomènes :



a) accroissement du courant résiduel (ICBO)
b) accroissement du courant de base (IB) par déplacement de la caractéristique d'entrée.
c) augmentation de β

- Expression de la température de la jonction

L'énergie transformée en calories dans la jonction de collecteur se propage à travers le cristal et le boîtier jusque dans le milieu ambiant (air en général). La jonction prend une température d'équilibre (tj). Evidemment, tj dépend de la température ambiante (t amb), de la puissance de collecteur (PC = VCE IC) et de l'aptitude du cristal et du boîtier à conduire la chaleur et à la répandre dans le milieu ambiant.

L'aptitude (qualité) d'évacuer la chaleur est une constante (Rth résistance thermique) pour un transistor donné. La résistance thermique est exprimée en degré par Watt pour les transistors de puissance et en degré par milliwatt pour ceux de faible puissance.

Exemple Rth = 0,4° C/mW signifie que la température de la jonction s'élève de 0,4° centigrade par milliwatt dissipé.

Donc l'expression de la température de la jonction est :

$$tj = ta + r(th)\, PC$$

t° jonction = t° ambiante + résistance thermique . puissance collecteur

Ex : ta = 25° , Rth = 0,5°/mW , PC = 100mW

$$tj = 25 + 0,5 \times 100 = 75°$$

- Puissance maximale de collecteur

La puissance maximale est atteinte lorsque tj est maximale (85° pour le germanium, 150° pour le silicium)

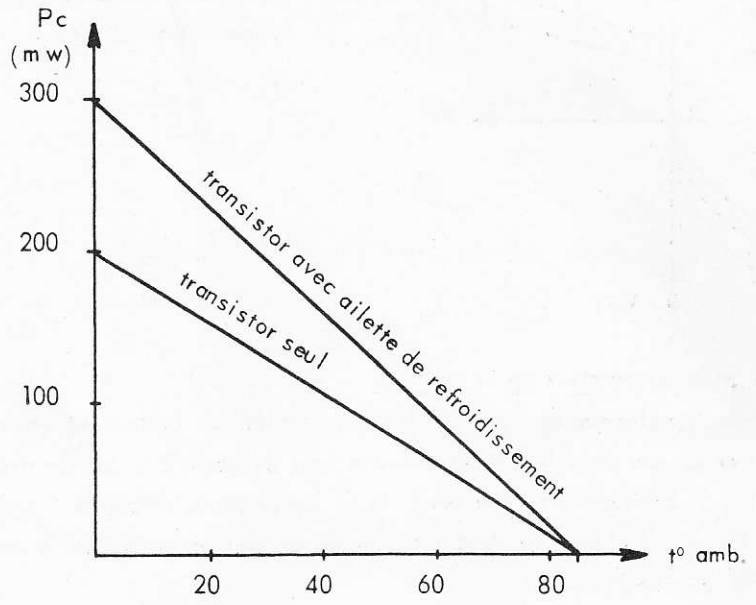
$$PC = \frac{tj - ta}{R\ th}$$

Ex : tj = 85 , ta = 45° , R(th) = 0,4°/mW

$$PC = \frac{85 - 45}{0,4} = 100\ mW$$

Pour un transistor donné, la puissance maximale de collecteur varie avec la température ambiante. On peut augmenter la puissance maximale en améliorant la résistance thermique (Rth)

par exemple en mettant une ailette métallique en contact avec le boîtier du transistor, ce qui augmente la surface de dégagement de la chaleur.

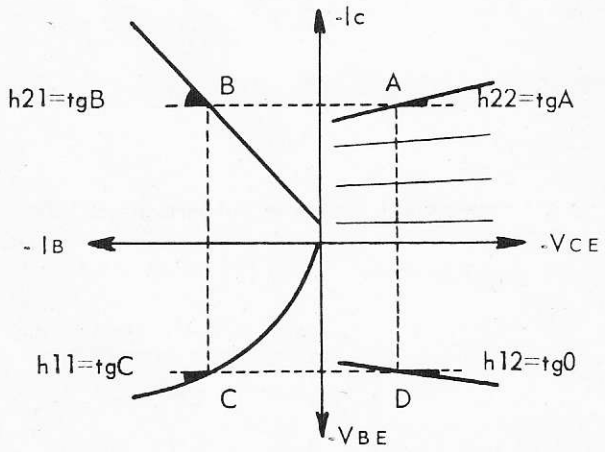


353 - PARAMETRES HYBRIDES-

Généralités

Pour des raisons de simplification des calculs, les constructeurs ont abandonné les paramètres naturels et emploient, pour les audio-frequences, les paramètres hybrides (non homogènes). Ces paramètres qui sont au nombre de 4 peuvent être déterminés sur un ensemble de 4 réseaux de caractéristiques.

Représentation géométrique des paramètres hybrides.



Les paramètres hybrides sont représentés physiquement par les pentes des caractéristiques.

h22 : pente de la caract. $-I_C = f(-V_{CE})$
h21 : pente de la caract. $-I_C = f(-I_B)$
h11 : pente de la caract. $-V_{BE} = f(-I_B)$
h12 : pente de la caract. $-V_{BE} = f(-V_{CE})$

h signifie hybride, l'indice (22) ou (21) est une notation provenant du calcul matriciel.

Suivant le montage employé les paramètres en h peuvent prendre des valeurs différentes ; pour les distinguer, on ajoute les indices b,e,c respectivement pour les montages : base commune, émetteur commun, collecteur commun.

354 - PARAMETRES FONDAMENTAUX

- Définition des 4 paramètres - (Emetteur commun)

- 1er Paramètre (1er quadrant) h22e

$$h22e = \frac{\Delta Ic}{\Delta VCE} \qquad \text{pour } IB \text{ constant}$$

(notons que $h22 = \frac{1}{Rs}$) c'est donc l'admitance de sortie

- 2ème Paramètre (2ème quadrant) h21e

$$h21e = \frac{\Delta Ic}{\Delta IB} \qquad \text{pour } VCE \text{ constante, notons que } h21e = \beta$$

C'est le rapport de transfert direct du courant.

- 3ème Paramètre (3ème quadrant) h11e

$$h11e = \frac{\Delta VBE}{\Delta IB} \qquad \text{pour } VCE \text{ constante}$$

notons que $h11e = re$. C'est donc la résistance d'entrée.

- 4ème Paramètre (4ème quadrant) h12e

$$h12e = \frac{\Delta VBE}{\Delta VCE} \qquad \text{pour } IB \text{ constant}$$

C'est le coefficient de contre-réaction interne du transistor.